

File 351:Derwent WPI 1963-2004/UD,UM &UP=200462

(c) 2004 Thomson Derwent

*File 351: For more current information, include File 331 in your search.
Enter HELP NEWS 331 for details.

1/5/1

DIALOG(R)File 351:Derwent WPI

(c) 2004 Thomson Derwent. All rts. reserv.

014959457 **Image available**

WPI Acc No: 2003-019971/200301

Related WPI Acc No: 2003-175082; 2003-713205; 2004-012254

XRPX Acc No: N03-015390

Objective for microlithographic projection, includes lens element with
axis perpendicular to specified fluoride crystal plane

Patent Assignee: ZEISS CARL (ZEIS); ZEISS SMT AG CARL (ZEIS); ZEISS
SEMICONDUCTOR MFG TECHNOLOGIES AG (ZEIS); ZEISS STIFTUNG CARL (ZEIS);
BRUNOTTE M (BRUN-I); HARTMAIER J (HART-I); HOLDERER H (HOLD-I); KAISER W
(KAIS-I); KOHL A (KOHL-I); KUGLER J (KUGL-I); MAUL M (MAUL-I); WAGNER C
(WAGN-I)

Inventor: BRUNOTTE M; KAISER W; WAGNER C; ENKISCH B; GERHARD M; KRAEHMER D;
MAUL M; ULRICH W; GRUNER T; ZACZEK C; KRAHMER D; HARTMAIER J; HOLDERER H;
KOHL A; KUGLER J

Number of Countries: 024 Number of Patents: 011

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
WO 200293209	A2	20021121	WO 2002EP5050	A	20020508	200301 B
DE 10123725	A1	20021121	DE 10123725	A	20010515	200303
DE 10123727	A1	20021121	DE 10123727	A	20010515	200303
DE 10125487	A1	20030102	DE 10125487	A	20010523	200303
DE 10127320	A1	20021212	DE 10127320	A	20010606	200306
KR 2003019577	A	20030306	KR 2003700622	A	20030115	200345
EP 1390783	A2	20040225	EP 2002738037	A	20020508	200415
			WO 2002EP5050	A	20020508	
US 20040105170	A1	20040603	WO 2002EP5050	A	20020508	200436
			US 2003367989	A	20030212	
KR 2004015251	A	20040218	KR 2003715260	A	20031115	200439
US 20040150806	A1	20040805	WO 2002EP4900	A	20020504	200452
			US 2003714573	A	20031114	
JP 2004526331	W	20040826	JP 2002589833	A	20020508	200456
			WO 2002EP5050	A	20020508	

Priority Applications (No Type Date): DE 10210782 A 20020312; DE 10123725 A
20010515; DE 10123727 A 20010515; DE 10125487 A 20010523; DE 10127320 A
20010606

Patent Details:

Patent No Kind Lan Pg Main IPC Filing Notes

WO 200293209 A2 G 106 G02B-003/00

Designated States (National): CN DE JP KR US

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU

MC NL PT SE TR

DE 10123725 A1 G03F-007/20

DE 10123727 A1 G02B-001/02

DE 10125487 A1 G03F-007/20
 DE 10127320 A1 G02B-003/00
 KR 2003019577 A G03B-021/00
 EP 1390783 A2 G G02B-003/00 Based on patent WO 200293209
 Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI
 LU MC NL PT SE TR
 US 20040105170 A1 G02B-017/00 Cont of application WO 2002EP5050
 KR 2004015251 A G02B-003/00
 US 20040150806 A1 G03B-027/54 Cont of application WO 2002EP4900
 JP 2004526331 W 171 H01L-021/027 Based on patent WO 200293209

Abstract (Basic): WO 200293209 A2

NOVELTY - At least one lens (1) is a (100)-lens. This has a lens axis (EA), standing approximately perpendicular to the (100) crystal plane, or to those crystal planes of the fluoride crystal which are equivalent to it.

DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM is included for the method of manufacturing the objective.

USE - An objective for microlithographic projection.

ADVANTAGE - In this objective, the influence of double refraction, especially intrinsic double refraction, is reduced.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The drawing is a schematic representation in perspective, of a cross section through a fluoride crystal block (3) perpendicular to the (100) crystal plane (5), together with a lens (element) of a projection objective.

lens element of objective (1)

fluoride crystal block (3)

specified crystal plane (5)

pp; 106 DwgNo 1/9

Title Terms: OBJECTIVE; PROJECT; LENS; ELEMENT; AXIS; PERPENDICULAR; SPECIFIED; FLUORIDE; CRYSTAL; PLANE

Derwent Class: P81; P82; P84; U11

International Patent Class (Main): G02B-001/02; G02B-003/00; G02B-017/00; G03B-021/00; G03B-027/54; G03F-007/20; H01L-021/027

International Patent Class (Additional): G02B-005/30; G02B-013/24;

G02B-017/08; G02F-001/00; G03B-027/72

File Segment: EPI; EngPI



⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 27 320 A 1**

⑤ Int. Cl.⁷:
G 02 B 3/00
G 02 B 1/02

② Aktenzeichen: 101 27 320.7
② Anmeldetag: 6. 6. 2001
④ Offenlegungstag: 12. 12. 2002

DE 101 27 320 A 1

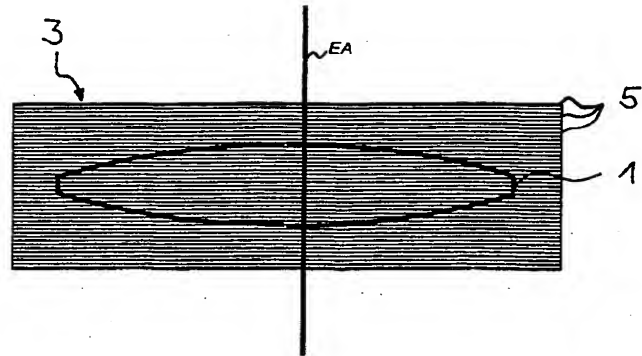
⑦ Anmelder:
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

⑦ Erfinder:
Brunotte, Martin, 73431 Aalen, DE; Kaiser, Winfried,
73431 Aalen, DE; Gerhard, Michael, 73432 Aalen,
DE; Maul, Manfred, 73434 Aalen, DE; Gruner, Toralf,
09122 Chemnitz, DE; Wagner, Christian, 73430
Aalen, DE; Krähmer, Daniel, Dr., 73431 Aalen, DE;
Ulrich, Wilhelm, 73434 Aalen, DE; Enkisch, Birgit,
73447 Oberkochen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ **Objektiv mit Fluorid-Kristall-Linsen**

⑤⑦ **Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit einer Linsensachse ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der <100>-Kristallrichtung auch in die <111>-oder in die <110>-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen.**



DE 101 27 320 A 1

[0002] Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

[0004] Die Indizierung der Kristallrichtungen wird im folgenden zwischen den Zeichen "<" und ">" angegeben, die Indizierung der Kristallebenen zwischen den Zeichen "{" und "}". Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen der entsprechenden Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung <100> in Richtung der Flächennormalen der Kristallebene {100}. Die kubischen Kristalle, zu denen die Fluorid-Kristalle gehören, weisen die Hauptkristallrichtungen <110>, < $\bar{1}10\bar{1}01\bar{1}0\bar{1}\bar{1}\bar{1}01\bar{1}0\bar{1}\bar{1}1\bar{1}\bar{1}\bar{1}\bar{1}\bar{1}1\bar{1}1\bar{1}\bar{1}\bar{1}\bar{1}11\bar{1}1\bar{1}\bar{1}00\bar{1}0\bar{1}\bar{1}00\bar{1}0\bar{1}\bar{1}10\bar{1}10\bar{1}10\bar{1}\bar{1}01\bar{1}0\bar{1}\bar{1}1\bar{1}\bar{1}\bar{1}\bar{1}\bar{1}1\bar{1}1\bar{1}\bar{1}1\bar{1}\bar{1}1\bar{1}11\bar{1}1\bar{1}$

[0006] Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung "Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren" mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Objektiv gemäß Anspruch 1 und 8, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 30, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 31, einem Verfahren zur Herstellung von Objektiven gemäß Anspruch 32 und einem Linsenherstellverfahren gemäß Anspruch 35.

[0010] Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung zusammenfallen. Die Linsenachsen fallen dann mit einer Hauptkristallrichtung zusammen, wenn die maximale Abweichung zwischen Linsenachse und Hauptkristallrichtung kleiner 5° ist. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-Linsen des Objektivs eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den $\{100\}$ -Kristallebenen stehen, werden im Folgenden auch als $\{100\}$ -Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Linsenachse in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung hat den Vorteil, daß sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtausbreitung in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung ergibt, erst bei höheren Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar macht als für eine Ausrichtung der Linsenachse in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Unter Öffnungswinkel versteht man in diesem Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der optischen Achse außerhalb einer Linse und zwischen dem Lichtstrahl und der Linsenachse innerhalb einer Linse. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung und der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung und der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung beträgt dabei 45° . Wäre die Linsenachse dagegen in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung und der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung nur 35° beträgt.

2

[0012] Die Linsenachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Linsenachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Als Linsen kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Auch Planplatten werden als Linsen angesehen, sofern sie im Strahlengang des Objektivs angeordnet sind. Die Linsenachse einer Planplatte steht dabei senkrecht auf den planen Linsenoberflächen. 5

[0013] Vorzugsweise handelt es sich jedoch bei den Linsen um rotationssymmetrische Linsen.

[0014] Objektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vorzugsweise sind die (100)-Linsen zentriert um diese optische Achse aufgebaut, so daß auch die Linsenachsen mit der optischen Achse zusammenfallen. 10

[0015] Vorteilhaft läßt sich die Erfindung bei Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage einsetzen, da für diese Objektive extrem hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen gestellt werden. Aber auch bei Prüfojektiven, mit denen beispielsweise Linsen für Projektionsobjektive durch Vermessung von Wellenfronten mit großer Öffnung getestet werden, wirkt sich der Einfluß der Doppelbrechung störend aus.

[0016] Bei Objektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen, insbesondere größer 0,7, treten innerhalb der (100)-Linsen Öffnungswinkel auf, die größer als 25°, insbesondere größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfindung zum Tragen, die Linsenachsen in <100>-Kristallrichtung zu orientieren. Wären die Linsenachsen in <111>-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25°, insbesondere größer als 30° deutlicher den störenden Einfluß der Doppelbrechung spüren, wenn nicht eine der weiter unten beschriebenen Korrekturmaßnahmen angewandt wird. 15

[0017] Da andererseits der störende Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so auszugestalten, daß alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere kleiner gleich 20

$$\epsilon \cdot \text{rcsin} \left(\frac{\text{NA}}{n_{\text{FK}}} \right)$$

sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Der Ausdruck 25

$$\arcsin \left(\frac{\text{NA}}{n_{\text{FK}}} \right)$$

gibt dabei den Öffnungswinkel an, welcher der bildseitigen numerischen Apertur innerhalb einer Fluorid-Kristall-Linse entspricht, wenn an der Lichtstrahl an einer planen Grenzfläche gebrochen wird. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen, plane Linsenflächen oder höchstens leicht zerstreuliche Linsenflächen aufweisen, wenn in Lichtrichtung nach der zerstreulichen Linsenfläche eine stärker sammelnde Linsenfläche folgt. 30

[0018] Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei Linsen in der Nähe von Feldebene, insbesondere der Bildebene auf. Die (100)-Linsen sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebene eingesetzt werden. Der Bereich, in dem die (100)-Linsen eingesetzt werden sollten, läßt sich über das Verhältnis der Linsendurchmessers zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Linsendurchmesser der (100)-Linsen vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers. 35

[0019] Bei Projektionsobjektiven treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in dem der Bildebene am nächsten gelegenen Linse auf. Deshalb wird vorzugsweise bei dieser Linse die Linsenachse in Richtung der <100>-Kristallrichtung ausgerichtet. 40

[0020] Die intrinsische Doppelbrechung einer Fluorid-Kristall-Linse ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimutwinkel des Lichtstrahls abhängig. So kann jeder Fluorid-Kristall-Linse eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ zugeordnet werden, die einerseits eine Funktion des Öffnungswinkels θ_L und andererseits eine Funktion des Azimutwinkels α_L ist. Der Wert der Doppelbrechung Δn gibt dabei für eine durch den Öffnungswinkel θ_L und den Azimutwinkel α_L bestimmte Strahlrichtung das Verhältnis des optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände zum im Fluorid-Kristall zurückgelegten physikalischen Strahlweg in der Einheit [nm/cm] an. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit von den Strahlwegen und der Linsenform unabhängig. Den optischen Wegunterschied für einen Strahl erhält man entsprechend durch Multiplikation der Doppelbrechung mit dem zurückgelegten Strahlweg. Der Öffnungswinkel θ_L wird zwischen der Strahlrichtung und der Linsenachse bestimmt, der Azimutwinkel α_L zwischen der in die zur Linsenachse senkrecht stehenden Kristallebene projizierten Strahlrichtung und einer mit der Linse fest verknüpften Bezugsrichtung. 45

[0021] Die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechungsverteilungen der einzelnen Fluorid-Kristall-Linsen führt dazu, daß die Strahlen eines Strahlbündels, das in der Bildebene des Objektivs auf einen Bildpunkt trifft, winkelabhängige optische Wegunterschiede $\Delta \text{OPL}(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfahren. Die optischen Wegunterschiede ΔOPL werden dabei in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ_R und des Azimutwinkel α_R angegeben. Der Öffnungswinkel θ_R eines Strahls wird dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel α_R zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Weist nun das Objektiv mindestens zwei Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall auf, so ist es vorteilhaft, wenn die Linsenachsen dieser Linsen oder Linsenteile in eine Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile derart gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind, daß die Vertei- 50 55 60 65

lung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzierte Werte im Vergleich zu einer Anordnung aufweist, bei der die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile gleich orientiert eingebaut sind. Da die Doppelbrechungsverteilungen der Linsen jedoch eine azimutale Abhängigkeit aufweisen, kann durch die verdrehte Anordnung der Linsen der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% im Vergleich zu einem gleich orientierten Einbau reduziert werden.

[0022] Unter Linsenteilen sind beispielsweise einzelne Linsen zu verstehen, die durch Ansprengen optisch nahtlos zu einer einzelnen Linse gefügt werden. Ganz allgemein bezeichnen Linsenteile die Bausteine einer einzelnen Linse, wobei die Linsenachsen der Linsenteile jeweils in Richtung der Linsenachse der einzelnen Linse weisen.

[0023] Durch den verdrehten Einbau der Fluorid-Kristall-Linsen kann insbesondere die Abhängigkeit der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ vom Azimutwinkel α_R deutlich reduziert werden, so daß sich eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ ergibt.

[0024] Zeigt die Linsenachse in eine Hauptkristallrichtung, so weist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linse eine k-zählige Azimutalsymmetrie auf. Beispielsweise zeigt die Doppelbrechungsverteilung einer (100)-Linse, bei der die Linsenachse in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 4-zählige Azimutalsymmetrie, die Doppelbrechungsverteilung einer (111)-Linse, bei der die Linsenachse in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 3-zählige Azimutalsymmetrie, und die Doppelbrechungsverteilung einer (110)-Linse, bei der die Linsenachse in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 2-zählige Azimutalsymmetrie. Je nach der Zähligkeit der Azimutalsymmetrie werden nun die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe um vorgegebene Drehwinkel γ gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet. Die Drehwinkel γ werden dabei zwischen den Bezugsrichtungen von je zwei Linsen oder Linsenteilen gemessen. Für die Linsen einer Gruppe weisen die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung. Die Bezugsrichtungen der Linsen einer Gruppe sind so mit den Linsen verknüpft, daß die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen. Somit treten für alle Linsen einer Gruppe die azimutalen Bereiche mit maximaler Doppelbrechung bei den gleichen Azimutwinkeln auf. Für n Linsen einer Gruppe sind die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen folgendermaßen gegeben:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$$

k gibt dabei die Zähligkeit der Azimutalsymmetrie, n die Zahl der Linsen einer Gruppe und m eine beliebige ganze Zahl an. Die Toleranz von $\pm 10^\circ$ berücksichtigt die Tatsache, daß unter Umständen die Drehwinkel von den theoretisch idealen Winkeln abweichen, um andere Randbedingungen bei der Objektivjustage berücksichtigen zu können. Eine Abweichung vom idealen Drehwinkel führt zu einem nicht optimalen azimutalen Ausgleich der optischen Wegunterschiede der Linsen einer Gruppe. Dies kann jedoch in gewissen Grenzen toleriert werden.

[0025] Für (100)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ.$$

Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise 45° , beziehungsweise 135° , 225° , ...

[0026] Für (111)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ.$$

[0027] Für (110)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ.$$

[0028] Die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$ kann dabei aber auch für den Einfluß einer einzelnen Gruppe von Linsen angegeben werden, indem nur diese Linsen bei der Doppelbrechungsauswertung betrachtet werden und die anderen Linsen als nicht doppelbrechend angenommen werden.

[0029] Die Linsen einer Gruppe werden beispielsweise dadurch bestimmt, daß ein äußerster Aperturstrahl eines Strahlenbüschels innerhalb dieser Linsen jeweils ähnliche Öffnungswinkel aufweist, wobei vorteilhafterweise die Öffnungswinkel des äußersten Aperturstrahls innerhalb dieser Linsen größer 15° , insbesondere größer 20° sind. Als äußerster Aperturstrahl wird ein Strahl bezeichnet, der von einem Objektpunkt ausgeht, dessen Strahlhöhe in der Blendenebene dem Radius der Blende entspricht und der somit in der Bildebene einen Winkel gemäß der bildseitigen numerischen Apertur aufweist. Die äußersten Aperturstrahlen werden deshalb zur Definition der Gruppen herangezogen, weil sie üblicherweise innerhalb der Linsen die größten Öffnungswinkel aufweisen und damit die größte Störung durch die Doppelbrechung erfahren. Die Bestimmung der optischen Wegdifferenz für zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen für die äußersten Aperturstrahlen ermöglicht somit Aussagen über die maximale Störung einer Wellenfront durch die Doppelbrechung.

[0030] Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in diesen Linsen jeweils einen gleichen Strahlweg zurückgelegt. Durch diese Maßnahmen ergibt sich ein guter Ausgleich der azimutalen Beiträge zur Verteilung der optischen Wegdifferenzen, die von den einzelnen Linsen einer Gruppe hervorgerufen werden, so daß die resultierende Verteilung der optischen Wegdifferenzen nahezu rotationssymmetrisch ist.

[0031] Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in jeder Linse einer Gruppe bei gleicher Orientie-

rung der Linsen ähnlich große optische Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt. Ist diese Bedingung erfüllt, tritt bei verdrehter Anordnung dieser Linsen ein optimaler Ausgleich der azimutalen Beiträge auf.

[0032] Im Fall von planparallelen benachbarten (100)- oder (111)-Linsen gleicher Dicke oder von vier planparallelen benachbarten (110)-Linsen gleicher Dicke erhält man eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede ΔOPL durch Drehung der Linsen gemäß obigen Formeln. Auch bei Linsen mit gekrümmten Oberflächen läßt sich durch geschickte Auswahl der Linsen einer Gruppe oder durch eine entsprechende Wahl der Dicken und der Radien der Linsen bereits durch Drehen von zwei Linsen eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielen. Bei (100)-Linsen oder (111)-Linsen ist es vorteilhaft, wenn eine Gruppe zwei Linsen aufweist. Bei (110)-Linsen stellt sich eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegdifferenzen für vier Linsen in einer Gruppe ein.

[0033] Besonders effektiv wird die Verdrehung der Linsen dann, wenn die Linsen benachbart angeordnet sind. Besonders vorteilhaft ist es, eine Linse in zwei Teile aufzuteilen und die Linsenteile gegeneinander verdreht optisch nahtlos zu fügen, beispielsweise durch Ansprengen.

[0034] Bei einem Projektionsobjektiv mit einer Vielzahl von Linsen ist es günstig, mehrere Gruppen von Linsen zu bilden. Dabei sind die Linsen einer Gruppe derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die resultierende Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ vom Azimutwinkel nahezu unabhängig ist.

[0035] Während nun die von den einzelnen Gruppen hervorgerufenen Verteilungen $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$ durch das gegenseitige Verdrehen der Linsen einer Gruppe nahezu unabhängig vom Azimutwinkel sind, kann der Maximalwert der Gesamtverteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des gesamten Objektivs dadurch deutlich reduziert werden, daß das Projektionsobjektiv sowohl mindestens eine Gruppe mit (100)-Linsen als auch mindestens eine Gruppe mit (111)-Linsen aufweist. Eine gute Kompensation ist auch möglich, wenn innerhalb des Objektivs neben einer Gruppe mit (100)-Linsen eine Gruppe mit (110)-Linsen angeordnet ist.

[0036] Die Kompensation ist möglich, weil die Doppelbrechung nicht nur einen absoluten Wert, sondern auch eine Richtung aufweist. Die Kompensation des störenden Einflusses der Doppelbrechung ist dann optimal, wenn die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (100)-Linsen hervorgerufen wird, und die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen hervorgerufen wird, ähnlich hohe Maximalwerte aufweist.

[0037] Als Material für die Linsen wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193 nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise bei einer Arbeitswellenlänge von 157 nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

[0038] Der störende Einfluss der intrinsische Doppelbrechung macht sich besonders dann bemerkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der Linsen große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0,7, insbesondere größer 0,8 ist.

[0039] Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193 nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157 nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248 nm. Die Erfindung läßt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm, insbesondere kleiner 160 nm aufweisen.

[0040] Bei dem Objektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Projektionsobjektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeordneten Linsen besteht, oder um ein Projektionsobjektiv vom kadioptrischen Objektivtyp.

[0041] Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.

[0042] Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

[0043] Die Erfindung stellt auch ein geeignetes Verfahren zur Herstellung von Objektiven bereit. Gemäß dem Verfahren werden Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall, deren Linsenachsen in eine Hauptkristallrichtung weisen, derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einer Linsenanordnung, bei der die Linsenachsen der Fluorid-kristall-Linsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und bei der die Linsen gleich orientiert angeordnet sind.

[0044] Das Verfahren sieht weiterhin vor, Gruppen mit (100)-Linsen und mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen zu bilden und diese parallel einzusetzen. Das Verfahren wird dabei beispielsweise bei einem Projektionsobjektiv angewandt, das mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen in $\langle 100 \rangle$ -Orientierung und mindestens zwei Linsen in $\langle 111 \rangle$ -Orientierung umfaßt. Von diesen Linsen ist dabei weiterhin die Lage der Bezugsrichtungen bekannt. Das Verfahren nutzt dabei die erfinderische Erkenntnis aus, daß sich durch Drehen der Fluorid-Kristall-Linsen um die optische Achse die Maximalwerte der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzieren lassen. Durch geeignete Simulationsmethoden wird dabei ein von einem Objektpunkt ausgehendes Strahlenbüschel durch ein Projektionsobjektiv propagiert und auf Grund der bekannten optischen Eigenschaften der Fluorid-Kristall-Linsen die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ in der Bildebene bestimmt. In einem Optimierungsschritt werden nun die Drehwinkel zwischen den Fluorid-Kristall-Linsen so lange geändert, bis die Doppelbrechung tolerierbare Werte aufweist. Der Optimierungsschritt kann dabei auch weitere Randbedingungen wie beispielsweise die Kompensation von nicht rotationssymmetrischen Linsenfehlern durch Linsendrehen berücksichtigen. Durch diesen Optimierungsschritt kann der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 30%, insbesondere bis zu 50% reduziert werden im Vergleich zu einem Projektionsobjektiv, bei dem die Fluorid-Kristall-Linsen gleich orientiert angeordnet sind. Das Optimierungsverfahren kann auch einen Zwischenschritt aufweisen.

In diesem Zwischenschritt werden aus den Fluorid-Kristall-Linsen Gruppen mit Linsen, wobei die Linsen einer Gruppe für einen äußersten Aperturstrahl bei gleich orientierter Anordnung der Linsen einen ähnlichen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erzeugen. In dem nachfolgenden Optimierungsschritt werden dann die Linsen nur innerhalb der Gruppen gedreht, um die optischen Wegunterschiede zu reduzieren. So lassen sich zunächst die (100)-Linsen derart drehen, daß die durch die (100)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden, und dann die (111)-Linsen derart drehen, daß die durch die (111)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden. Die Verteilung der Fluorid-Kristall-Linsen auf Linsen mit (100)-Orientierung und (111)-Orientierung muß bei der Optimierung so erfolgen, daß sich die resultierende (100)-Verteilung $\Delta OPL_{100}(\alpha_R, \theta_R)$ und die resultierende (111)-Verteilung $\Delta OPL_{111}(\alpha_R, \theta_R)$ weitgehend kompensieren. Entsprechendes gilt auch für den parallelen Einsatz von (100)-Linsen und (110)-Linsen.

[0045] Die Erfindung betrifft auch ein Herstellverfahren für eine Linse, bei dem in einem ersten Schritt mehrere Platten aus Fluorid-Kristall optisch nahtlos zu einem Blank gefügt werden, und in einem zweiten Schritt die Linse aus dem Blank durch bekannte Herstellmethoden herausgearbeitet wird. Die Platten werden dabei wie zuvor für Linsen oder Linsenteile beschrieben, zueinander um die Flächennormalen verdreht angeordnet.

[0046] Platten, deren Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, haben vorteilhafterweise die gleiche axiale Dicke.

[0047] Werden (100)-Platten mit (111)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (111)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten $= 1.5 \pm 0.2$ betragen.

[0048] Werden (100)-Platten mit (110)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (110)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten $= 4.0 \pm 0.4$ betragen.

[0049] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

[0050] Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den {100}-Kristallebenen zusammen mit einer Linse eines Projektionsobjektives in schematischer Darstellung;

[0051] Fig. 2A-C zeigen je eine planparallele (100)-, (111)- und (110)-Linse in einer schematischen dreidimensionalen Darstellung;

[0052] Fig. 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des Azimutwinkels;

[0053] Fig. 4A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (100)-Linsen in verschiedenen Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um 45° verdrehte (100)-Linsen;

[0054] Fig. 5A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um 60° verdrehte (111)-Linsen;

[0055] Fig. 6A-G zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um 90° verdrehte (110)-Linsen, beziehungsweise für vier gegeneinander um 45° verdrehte (110)-Linsen;

[0056] Fig. 7 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektives;

[0057] Fig. 8 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektives; und

[0058] Fig. 9 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer Darstellung.

[0059] Fig. 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt ist so gewählt, daß die {100}-Kristallebenen 5 als einzelne Linien zu sehen sind, so daß die {100}-Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-Block 3 dient als Blank oder Ausgangsmaterial für die (100)-Linse 1. In diesem Beispiel ist die (100)-Linse 1 eine Bikonvex-Linse mit der Linsenachse EA, die zugleich Symmetrieachse der Linse ist. Die Linse 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Linsenachse EA senkrecht auf den {100}-Kristallebenen steht.

[0060] In Fig. 2A wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die $\langle 101 \rangle$ -, $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ -, $\langle 10\bar{1} \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 203 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich in den $\langle 101 \rangle$ -, $\langle 110 \rangle$ -, $\langle 10\bar{1} \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 45° und einem Azimutwinkel von 0° , 90° , 180° und 270° innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von 45° , 135° , 225° und 315° ergeben sich minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

[0061] In Fig. 2B wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 205 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die $\langle 011 \rangle$ -, $\langle 101 \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch drei "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den $\langle 011 \rangle$ -, $\langle 101 \rangle$ - und $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 35° und einem Azimutwinkel von 0° , 120° und 240° innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von 60° , 180° und 300° ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

[0062] In Fig. 2C wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 209 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die $\langle 01\bar{1} \rangle$ -, die $\langle 10\bar{1} \rangle$ -, die $\langle 101 \rangle$ - und die $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch fünf "Keulen" 211 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die

maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich zum einen in Richtung der Linsenachse EA, und zum anderen jeweils in der $\langle 01\bar{1} \rangle$, $\langle 10\bar{1} \rangle$, $\langle 101 \rangle$ und $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtung, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 0° , beziehungsweise mit einem Öffnungswinkel von 60° und den vier Azimutwinkeln, die sich durch Projektion der $\langle 01\bar{1} \rangle$, $\langle 10\bar{1} \rangle$, $\langle 101 \rangle$ und $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen in die $\{110\}$ -Kristallebene ergeben. Derartig hohe Öffnungswinkel treten in Kristallmaterial jedoch nicht auf, da die maximalen Öffnungswinkel durch die Brechzahl des Kristalls auf kleiner 45° beschränkt sind.

[0063] Die Definition von Öffnungswinkel θ und Azimutwinkel α ist in Fig. 3 dargestellt. Für die (100)-Linse von Fig. 2 zeigt die z-Achse in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung, die x-Achse in die Richtung, die sich durch Projektion der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung in die $\{100\}$ -Kristallebene ergibt. Die z-Achse ist dabei gleich der Linsenachse und die x-Achse gleich der Bezugsrichtung.

[0064] Aus der zitierten Internetpublikation ist bekannt, daß Messungen bei Strahlausbreitung in der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung einen Doppelbrechungswert von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm für Kalzium-Fluorid ergeben haben. Mit diesem Messwert als Normierungsgröße kann die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ einer Kalzium-Fluorid-Linse in Abhängigkeit der Kristallorientierung theoretisch abgeleitet werden. Dazu werden die aus der Kristalloptik bekannten Formalismen zur Berechnung der Indexellipsoide in Abhängigkeit der Strahlrichtung herangezogen. Die theoretischen Grundlagen sind beispielsweise im "Lexikon der Optik", Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999 unter dem Stichwort "Kristalloptik" zu finden.

[0065] In Fig. 4A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 45^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0066] In Fig. 4B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 45^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Die vierzählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

[0067] In Fig. 4C ist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (100)-Linse dargestellt. Jede Linie repräsentiert Betrag und Richtung für eine durch den Öffnungswinkel θ und den Azimutwinkel α definierte Strahlrichtung. Die Länge der Linien ist proportional zum Betrag der Doppelbrechung, beziehungsweise der Differenz der Hauptachsenlängen der Schnittellipse, während die Richtung der Linien die Orientierung der längeren Hauptachse der Schnittellipse angibt. Die Schnittellipse erhält man, indem man das Indexellipsoid für den Strahl der Richtung (θ, α) mit einer Ebene schneidet, die senkrecht auf der Strahlrichtung steht und durch die Mitte des Indexellipsoids geht. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Vierzähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln 0° , 90° , 180° und 270° maximal.

[0068] Fig. 4D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke um 45° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen tangential. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der planparallelen (100)-Linsen multipliziert. Rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel β zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

wobei n die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der maximale Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 30% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0069] In Fig. 4E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 4D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ beträgt 4.2 nm/cm und ist somit um 35% zu dem Maximalwert von 6.5 nm/cm in Fig. 4A reduziert.

[0070] In Fig. 4F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 4D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .

[0071] In Fig. 5A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0072] In Fig. 5B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Die dreizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

[0073] Fig. 5C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (111)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Dreizähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln 0° , 120° und 240° maximal. Im Gegensatz zu einer (100)-Linse dreht sich die Orientierung der Doppelbrechung um 90° , wenn ein Strahl anstatt mit einem Azimutwinkel von 0° mit einem Azimutwinkel von 180° durch eine Linse läuft. Somit kann beispielsweise durch zwei gleich orientierte (111)-Linsen die Doppelbrechung kompensiert werden,

wenn die Strahlwinkel eines Strahlbüschels zwischen den beiden Linsen ihr Vorzeichen tauschen.

[0074] Fig. 5D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke um 60° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Fig. 4C radial. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (111)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$$

wobei k die Anzahl der planparallelen (111)-Linsen angibt und 1 eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 68% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0075] In Fig. 5E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 5D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ beträgt 2.8 nm/cm und ist somit um 57% zu dem Maximalwert von 6.5 nm/cm in Fig. 5A reduziert.

[0076] In Fig. 5F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 5D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .

[0077] Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (111)-Linsen steht, wie dies den Fig. 4D und 5D zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (111)-Linsen.

[0078] In Fig. 6A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (110)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkels $\theta = 0^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0079] In Fig. 6B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 35^\circ$ für eine (110)-Linse dargestellt. Die zweizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

[0080] Fig. 6C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (110)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Zweizähligkeit der Verteilung. Die Linie mit maximaler Länge und damit die maximale Doppelbrechung ergibt sich für den Öffnungswinkel $\theta = 0^\circ$.

[0081] Fig. 6D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke um 90° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ weist nun eine vierzählige Azimutalsymmetrie auf. Maximale Doppelbrechungswerte treten bei den Azimutwinkeln $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ und 315° auf, wobei der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 40^\circ$ 2.6 nm/cm beträgt.

[0082] Fig. 6E zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn die zwei planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 6C mit zwei weiteren planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke kombiniert werden. Der Drehwinkel zwischen je zwei der (110)-Linsen beträgt 45° . Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Fig. 4C radial, also ähnlich der Verteilung von Fig. 5C. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (110)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man $4 \cdot n$ planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel β zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{45^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

wobei $4 \cdot n$ die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt

sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0083] In Fig. 6F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 6E dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ beträgt 1.0 nm/cm und ist somit um 84% zu dem Maximalwert von 6.5 nm/cm in Fig. 5A reduziert.

[0084] In Fig. 6G ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 6E dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .

[0085] Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektivs Gruppen mit (110)-Linsen und Gruppen mit (100)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (110)-Linsen und einer Gruppe mit (100)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (110)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen steht, wie dies den Fig. 4D und 6E zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (110)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen.

[0086] In Fig. 7 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.9. Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, daß die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner 1.8 mλ bezogen auf die Wellenlänge von 157 nm ist. Gerade bei diesen Hochleistungsobjektiven ist es erforderlich, daß störende Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich reduziert werden.

[0087] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 6 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege RL_L des äußersten Aperturstrahls 609 für die einzelnen Linsen L601 bis L630 berechnet. Der äußerste Aperturstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0$ mm und $y = 0$ mm aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der äußerste Aperturstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen ergeben.

Tabelle 2

Linse	Öffnungswinkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
L601	8.1	15.1	2.9	-2.2	-0.8	-0.4	-9.0	-9.0	-9.1	-9.0
L602	8.1	8.2	1.7	-1.2	-0.5	-0.2	-4.9	-4.8	-4.9	-4.8
L603	7.1	9.5	1.7	-1.3	-0.4	-0.2	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
L604	10.1	7.2	1.9	-1.3	-0.6	-0.3	-4.1	-4.1	-4.1	-4.1
L605	9.4	6.5	1.5	-1.0	-0.4	-0.2	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8
L606	10.1	8.5	2.1	-1.4	-0.7	-0.3	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
L607	21.1	12.7	6.6	-2.7	-3.9	-1.8	-4.2	-4.2	-4.3	-4.2
L608	25.4	22.2	12.8	-4.4	-8.7	-3.9	-5.3	-5.7	-5.8	-5.7
L609	16.1	36.1	14.3	-7.6	-6.8	-3.3	-16.5	-16.5	-16.7	-16.5
L610	12.1	15.2	4.5	-2.9	-1.7	-0.8	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2
L611	2.1	26.6	1.4	-1.3	-0.1	-0.1	-17.2	-17.2	-17.2	-17.2
L612	2.1	32.2	1.6	-1.5	-0.1	-0.1	-20.8	-20.8	-20.8	-20.8
L613	-18.1	30.4	-6.6	13.5	-7.0	-3.3	-12.5	-12.6	-12.7	-12.6
L614	-18.1	22.0	-4.8	10.0	-5.3	-2.5	-8.9	-8.9	-9.0	-8.9
L615	-14.0	10.2	-2.0	3.5	-1.5	-0.7	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1
L616	-1.1	29.8	-0.8	0.9	0.0	0.0	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
L617	26.4	31.6	18.6	-6.1	-13.0	-5.7	-6.7	-7.6	-7.5	-7.6
L618	33.1	14.3	9.3	-2.0	-7.9	-3.1	-0.6	3.2	-1.4	3.2
L619	26.1	7.5	4.4	-1.4	-3.1	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
L620	19.1	6.4	3.0	-1.4	-1.6	-0.8	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
L621	6.1	8.0	1.3	-1.0	-0.3	-0.1	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
L622	-10.1	7.7	-1.3	1.9	-0.6	-0.3	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
L623	-11.1	9.6	-1.8	2.8	-1.0	-0.5	-5.2	-5.2	-5.2	-5.2
L624	0.1	17.8	0.1	-0.1	0.0	0.0	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
L625	6.0	16.3	2.3	-1.8	-0.5	-0.2	-9.9	-9.9	-10.0	-9.9
L626	-24.0	9.0	-1.9	5.0	-3.2	-1.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6
L627	-35.4	8.0	-0.9	5.2	-4.7	-1.7	0.1	2.1	-0.5	2.1
L628	-39.4	12.0	-1.0	7.6	-7.5	-2.5	1.0	4.0	-0.3	4.0
L629	-35.1	27.3	-3.3	17.7	-15.7	-5.9	0.5	6.9	-1.9	6.9
L630	-35.1	26.0	-3.1	16.9	-15.0	-5.6	0.4	6.5	-1.9	6.5
Summe			64,5	42,3	112,9	47,4	-198,2	-178,7	-208,0	-178,8

[0088] Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen RL_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 2 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt. Die optischen Wegunterschiede sind für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen zusammengestellt, wobei der Azimutwinkel α_L des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0° , 45° , 90° und 135° beträgt.

[0089] Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel θ für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als 25° , für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als 30° sind. Besonders betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630.

[0090] Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner 45° ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt $39,4^\circ$ bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.

[0091] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270 mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207 mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blendendurchmessers.

[0092] Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß es für einzelne Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Dies liegt daran, daß bei (100)-Linsen

der Einfluß der $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen erst bei größeren Winkeln zu spüren ist wie bei (111)-Linsen. Beispielsweise bei den Linsen L608, L609 und L617 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 30% niedriger.

[0093] Anhand der beiden planparallelen Linsen L629 und L630 läßt sich gut zeigen, wie durch gegenseitige Drehung der Linsen die Doppelbrechung deutlich reduziert werden kann.

[0094] Beide Linsen weisen gleiche Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl von 35.3° und ähnliche Strahlwege von 27.3 mm, beziehungsweise 26.0 mm auf. Würden beide Linsen als (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 30.7 nm ergeben. Verdreht man die beiden (100)-Linsen jedoch gegenseitig um 45° , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 20.9 nm, also um 32%. Würden beide Linsen als (111)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 34.6 nm ergeben. Verdreht man die beiden (111)-Linsen jedoch gegenseitig um 60° , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 13.6 nm, also um 61%.

[0095] Eine nahezu vollständige Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund der intrinsischen Doppelbrechung, die durch die Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, kann erreicht werden, wenn die Linse L629 in die Linsen L6291 und L6292 und die Linse L630 in die Linsen L6301 und L6302 aufgespalten wird, wobei die Linse L6291 eine (100)-Linse der Dicke 9.15 mm, die Linse L6292 eine (111)-Linse der Dicke 13.11 mm, die Linse L6301 eine (100)-Linse der Dicke 8.33 mm und die Linse L6302 eine (111)-Linse der Dicke 12.9 mm ist. Die Linse L6291 und L6301 werden gegeneinander um 45° , die Linsen L6292 und L6302 um 60° gedreht. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall dann 0.2 nm. Die Linsen L6291 und L6292, ebenso wie die Linsen L6301 und L6302 können optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden. Dieses Prinzip ist auch anwendbar, wenn das Projektionsobjektiv nur eine Kristall-Linse enthält. Diese wird dann mindestens in zwei Linsen zerlegt, die zueinander gedreht angeordnet werden. Das Zusammenfügen ist durch Ansprengen möglich. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst einzelne Platten der gewünschten Kristallorientierung optisch nahtlos zu verbinden und in einem weiteren Verfahrensschritt die Linse aus den aneinandergefügt Platten zu fertigen.

[0096] Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, die Linse L629 in die Linsen L6293 und L6294 sowie die Linse L630 in die Linsen L6303 und L6304 aufgespalten werden, wobei die Linse L6293 dann eine (110)-Linse der Dicke 11.13 mm, die Linse L6294 eine (110)-Linse der Dicke 11.13 mm, die Linse L6303 eine (110)-Linse der Dicke 10.62 mm und die Linse L6304 eine (110)-Linse der Dicke 10.62 mm ist. Die Linsen L6293 und L6294, sowie die Linsen L6303 und L6304 werden jeweils gegeneinander um 90° gedreht, wobei der Drehwinkel zwischen der Linse L6293 und L6303 45° beträgt. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall 4.2 nm. Die Linsen L6293 und L6294, ebenso wie die Linsen L6303 und L6304 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

[0097] Nahezu vollständig gelingt eine Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch die hoch belasteten Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, wenn jede Linse in drei Linsenteile L6295, L6296 und L6297 bzw. L6305, L6306 und L6307 aufgespalten wird, wobei die Linse L6295 dann eine (100)-Linse der Dicke 4.45 mm, die Linsen L6296 und L6297 (110)-Linsen der Dicke 8.90 mm, die Linse L6305 eine (100)-Linse der Dicke 4.25 mm und die Linsen L6306 und L6307 (110)-Linsen der Dicke 8.49 mm sind. Die Linsen L6294 und L6304 werden gegeneinander um 45° , je zwei der Linsen L6295, L6297, L6306 und L6307 um 45° gedreht. In dieser Kombination verringert sich der resultierende maximale optische Wegunterschied auf unter 0,1 nm. Die Linsen L6295 bis L6297, ebenso wie die Linsen L6305 bis L6307 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

[0098] Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, zwei (110)-Linsen mit einer (100)-Linse zu kombinieren. Die beiden (110)-Linsen sind dabei um 90° gegeneinander verdreht einzubauen, während der Drehwinkel zwischen der (100)-Linse und den (110)-Linsen $45^\circ + m \cdot 90^\circ$ beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist. Dazu werden die Linse L629 in die Linsen L6298 und L6299 sowie die Linse L630 in die Linsen L6308 und L6309 aufgespalten, wobei die Linse L6298 dann eine (110)-Linse der Dicke 17.40 mm, die Linse L6299 eine (110)-Linse der Dicke 4.87 mm, die Linse L6308 eine (110)-Linse der Dicke 12.53 mm und die Linse L6309 eine (100)-Linse der Dicke 8.70 mm ist. Der resultierende maximale optische Wegunterschied liegt bei 3,1 nm. Die Linsen L6298 und L6299, ebenso wie die Linsen L6308 und L6309 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

[0099] In Fig. 8 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 711 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.8.

[0100] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 8 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege RL_L des oberen äußersten Aperturstrahls 713 und des unteren äußersten Aperturstrahls 715 für die einzelnen Linsen L801 bis L817 berechnet. Die äußersten Aperturstrahlen 713 und 715 gehen dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0$ mm und $y = -82.15$ mm aus und weisen in der Bildebene Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welche der bildseitigen numerischen Apertur entsprechen. Der obere und der untere äußerste Aperturstrahl wurden berechnet, da es sich um ein achsfernes Objektfeld handelt und somit die Aperturstrahlen nicht symmetrisch zur optischen Achse verlaufen, wie dies für den äußersten Aperturstrahl des Ausführungsbeispiels der Fig. 7 der Fall war.

[0101] In Tabelle 4 sind die Daten für den oberen äußersten Aperturstrahl und in Tabelle 5 für den unteren äußersten Aperturstrahl zusammengestellt. Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen RL_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt; und zwar für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-

DE 101 27 320 A 1

Linsen, wobei der Azimutwinkel α_L des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0° , 45° , 90° und 135° beträgt.

Tabelle 4

Linse	Öffnungswinkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	1.4	28.1	0.8	-0.8	0.0	0.0	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2
802	-10.3	30.7	-5.3	8.0	-2.7	-1.3	-17.2	-17.2	-17.3	-17.2
803	-15.6	32.4	-6.8	12.4	-5.7	-2.7	-15.3	-15.3	-15.4	-15.3
803	-24.4	31.8	-6.5	17.8	-11.7	-5.2	-8.4	-8.8	-9.0	-8.8
802	-19.1	26.6	-5.8	12.4	-6.8	-3.2	-10.2	-10.3	-10.4	-10.3
804	6.4	20.1	3.0	-2.4	-0.6	-0.3	-12.4	-12.4	-12.4	-12.4
805	10.3	34.4	9.0	-6.0	-3.0	-1.5	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
806	0.2	10.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-6.5	-6.5	-6.5	-6.5
807	-11.1	22.0	-3.9	5.9	-2.1	-1.0	-12.2	-12.2	-12.3	-12.2
808	0.1	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
809	-0.3	9.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
810	1.1	12.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
811	-16.3	9.4	-2.0	3.8	-1.9	-0.9	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
812	-10.4	29.8	-5.0	7.5	-2.4	-1.2	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9
813	-8.3	34.7	-5.2	7.3	-2.1	-1.0	-20.5	-20.5	-20.5	-20.5
814	-9.4	17.5	-2.8	4.0	-1.2	-0.6	-10.2	-10.2	-10.2	-10.2
815	-27.4	28.1	-5.3	16.9	-12.2	-5.3	-5.2	-6.4	-6.1	-6.4
816	-28.7	40.2	-7.1	24.8	-18.6	-7.9	-6.2	-8.5	-7.6	-8.5
817	-30.3	39.0	-6.3	24.7	-19.6	-8.1	-3.9	-8.0	-5.7	-8.0
Summe			-48.9	136.1	-90.9	-40.3	-212.9	-220.9	-218.0	-220.9

Tabelle 5

Linse	Öffnungswinkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	-11.6	32.1	-5.8	9.0	-3.2	-1.6	-17.6	-17.6	-17.6	-17.6
802	19.2	28.3	13.3	-6.1	-7.3	-3.4	-10.9	-10.9	-11.1	-10.9
803	24.2	33.8	19.1	-6.9	-12.7	-5.7	-8.6	-9.2	-9.3	-9.2
803	17.2	34.3	14.7	-7.4	-7.5	-3.6	-14.6	-14.6	-14.8	-14.6
802	12.2	31.6	9.7	-6.0	-3.8	-1.8	-16.7	-16.7	-16.8	-16.7
804	-5.2	27.7	-2.7	3.3	-0.6	-0.3	-17.4	-17.4	-17.4	-17.4
805	-4.2	34.6	-3.0	3.5	-0.5	-0.3	-21.9	-21.9	-21.9	-21.9
806	-8.6	19.5	-2.9	4.0	-1.1	-0.6	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
807	-0.2	16.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
808	-8.2	25.6	-3.7	5.0	-1.3	-0.7	-15.3	-15.3	-15.3	-15.3
809	-7.2	10.1	-1.3	1.8	-0.4	-0.2	-6.1	-6.1	-6.1	-6.1
810	-9.2	13.1	-2.0	2.9	-0.8	-0.4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
811	9.0	9.9	2.1	-1.5	-0.6	-0.3	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
812	2.6	30.7	1.8	-1.6	-0.2	-0.1	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
813	0.9	34.0	0.6	-0.6	0.0	0.0	-22.1	-22.1	-22.1	-22.1
814	1.2	10.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7
815	23.2	16.3	8.9	-3.4	-5.7	-2.6	-4.7	-4.8	-4.9	-4.8
816	24.6	37.2	21.0	-7.6	-13.9	-6.2	-9.6	-10.2	-10.3	-10.2
817	29.4	29.6	18.5	-5.1	-14.1	-5.9	-4.0	-6.2	-5.2	-6.2
Summe			88.3	-16.8	-73.7	-33.5	-231.9	-235.4	-235.2	-235.4

[0102] Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel θ für die Linsen L815 bis L817 größer als 25° sind. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf. Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel kleiner gleich

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$$

ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 30.8° für die Linse L817.

[0103] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193 mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als 162 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

[0104] Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß es für Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Beispielsweise bei den Linsen L815 bis L817 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 20% niedriger.

[0105] Anhand des Ausführungsbeispiels der Fig. 8 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch den parallelen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen die intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden kann.

[0106] Zunächst werden alle Kalzium-Fluorid in (111)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (111)-Linsen eingebaut. In diesem Fall ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 136 nm. Durch Drehen der (111)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 38 nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 60° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 30° .

[0107] Werden alle Kalzium-Fluorid in (100)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (100)-Linsen eingebaut, so ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 90.6 nm. Durch Drehen der (100)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 40 nm reduziert wer-

den. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 45° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammenge-

faßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 22.5° .
[0108] Eine maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 7 nm erhält man, wenn man nun Gruppen mit (100)-Linsen mit Gruppen mit (111)-Linsen kombiniert. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe von (111)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 60° beträgt. Die Linsen L802 und L803 werden zu einer Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 45° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (100)-Linsen werden die Linsen L808, L809 und L810 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (111)-Linsen werden die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von 22.5° . Die Linsenachsen der nicht zu einer Gruppe zusammengefaßten Linsen L805 und L807 sind in $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung orientiert, während die Linsenachse der Linse L806 in $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung orientiert ist. Die Gruppen können gegenseitig beliebig um die optische Achse verdreht angeordnet sein. Diese Drehfreiheitsgrade lassen sich zur Kompensation nicht rotationssymmetrischer Aberrationen ausnützen, die beispielsweise durch die Fassung der Linsen erzeugt werden.

[0109] Um Doppelbrechung von Kristallen im UV zu kompensieren, kann man, wie oben beschrieben, Kristall-Elemente mit verschiedenen Orientierungen der Kristallachsen hintereinander anordnen. Wenn man in einem optischen System Linsen mit verschiedenen Kristallrichtungen hintereinander anordnet, hat man das Problem, daß vielfach Linsen mit verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden, die Kompensation dann möglicherweise nur eingeschränkt möglich ist. Bei Optiken, die nur eine Kristalllinse enthalten, ist diese Art der Kompensation überhaupt nicht möglich.

[0110] Eine Lösungsmöglichkeit ist es, eine Linse konstruktiv in zwei aufzuspalten, die verdreht gegeneinander anzusprengen sind. Praktisch leidet dieses Verfahren an Spannungen, die die Linse verformen und daran, daß die beiden Hälften lateral mit einer Genauigkeit von Mikrometern positioniert werden müssen.

[0111] Vorgeschlagen wird, Blanks aus aneinander angesprengten, hinsichtlich der Orientierung der Kristallachsen gegeneinander verdrehten Einzelplatten herzustellen, die dann zu einer Linse gefräst und poliert werden. Alles obengesagte über die Orientierung gilt auch hierfür. Außer dem klassischen Ansprengen (wringing) der Optik-Fertigung sind auch alle anderen Fügetechniken mit innigem Kontakt und geringstmöglichem Spannungseintrag möglich und von der Erfindung umfaßt. Das Ansprengen kann insbesondere durch Schichten, z. B. aus Quarzglas, unterstützt werden. Wichtig ist, daß an der Fugestelle keine Brechung oder Reflexion auftritt, die störend wäre.

[0112] Die Auswahl der Orientierungen erfolgt nach den oben beschriebenen Regeln.

[0113] Als Ausführungsbeispiele werden Blanks angegeben, aus denen sich beispielsweise die Linse L816 für das Projektionsobjektiv der Fig. 8 fertigen läßt. Die Linse L816 weist eine konvexe asphärische Vorderfläche mit dem Scheitelradius 342.13 mm und eine konkave sphärische Rückfläche mit dem Scheitelradius 449.26 mm auf. Die axiale Dicke beträgt 37.3 mm. Das Linsenmaterial ist Kalzium-Fluorid. Der Linsendurchmesser beträgt 141 mm. Das Blank, aus dem die Linse herausgearbeitet werden soll, benötigt mindestens eine Gesamtdicke von 45 mm und einen Durchmesser von 150 mm. Das Blank kann dabei aus zwei gegeneinander um 45° gedrehten (100)-Platten der Dicke 9.0 mm und zwei gegeneinander um 60° gedrehten (111)-Platten der Dicke 13.5 mm bestehen, die optisch nahtlos gefügt sind. Die (100)-Platten und die (111)-Platten sollten dabei jeweils benachbart angeordnet sein.

[0114] In einer weiteren Ausführungsform werden sechs jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 3.0 mm und sechs jeweils gegeneinander um 60° gedrehte (111)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei jeweils nach zwei (100)-Platten zwei (111)-Platten folgen.

[0115] In einer weiteren Ausführungsform werden vier jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (110)-Platten der Dicke 9.0 mm und zwei gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei die zwei (100)-Platten auf die vier (110)-Platten folgen.

[0116] In einer weiteren Ausführungsform werden acht jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (110)-Platten der Dicke 4.5 mm und vier gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 2.25 optisch nahtlos gefügt, wobei nach vier (110)-Platten jeweils zwei (100)-Platten folgen.

[0117] Anhand von Fig. 9 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsenanordnung 89 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die Linsenanordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsenanordnung 89 sind in Fig. 6 und Fig. 7 gegeben. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet, die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikrolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise ein Wafer, gehalten.

[0118] Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge λ des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge λ der Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Fig. 6 und Fig. 7 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150 nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden. Durch die Erfindung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

DE 101 27 320 A 1

Tabelle 1

M1587a

LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.629nm	1/2 FREIER DURCHMESSER	S
0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200	
	0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673	
L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	53.454	
	-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	54.049	10
L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178	
	-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	54.901	
L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	53.988	
	-155.450516203	15.930502944	N2	1.00031429	54.132	
L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	53.748	
	-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	55.167	15
L605	-86.993585564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580	
	-238.150965327	5.379130780	N2	1.00031429	53.729	
L606	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	53.730	
	153.417884485	34.150169591	N2	1.00031429	56.762	
L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	58.081	
	8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	74.689	20
L608	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	87.291	
	-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	91.858	
L609	-4831.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	117.436	
	-192.197373609	1.688916911	N2	1.00031429	121.408	
L610	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	127.704	25
	-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	129.305	
L611	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	137.016	
	1233.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428	
L612	1205.457051945	49.281218258	CaF2	1.55929035	138.288	
	-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	138.379	30
L613	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	108.652	
	-4389.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	106.138	
L614	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	103.602	
	149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589	
L615	281.093108064	6.792868960	CaF2	1.55929035	83.373	
	18.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	77.968	35
L616	-222.157416308	5.094651720	CaF2	1.55929035	77.463	
	101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826	
L617	-100.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	72.237	
	1611.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	89.760	
L618	-415.596135628	26.398111993	CaF2	1.55929035	96.803	
	-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	103.409	40
L619	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	116.636	
	-231.917626896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569	
L620	-790.657607677	23.400482872	CaF2	1.55929035	128.806	
	-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	130.074	
L621	786.625567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	141.705	45
	-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089	
	0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	134.586	
L622	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	139.341	
	445.912291916	0.619840486	N2	1.00031429	137.916	
L623	358.934076212	48.662890509	CaF2	1.55929035	136.936	
	-622.662988878	30.955714157	N2	1.00031429	135.288	50
L624	-224.404889753	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760	
	-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	134.853	
L625	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	134.101	
	-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	136.109	
L626	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	101.240	
	338.140581666	0.925956949	N2	1.00031429	97.594	55
L627	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023	
	169.576109839	0.777849447	N2	1.00031429	81.164	
L628	117.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	75.464	
	921.219058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	69.501	
L629	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637	60
	0.000000000	4.245543100	N2	1.00031429	48.606	
L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	41.032	
	0.000000000	8.491086200	N2	1.00031429	26.698	
	0.000000000	0.000000000		1.00000000	11.550	

Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

65

DE 101 27 320 A 1

ASPHAERISCHE KONSTANTEN

Asphäre der Linse L601

5	K	0.0000
	C1	1.28594437e-007
	C2	8.50731836e-013
	C3	1.16375620e-016
	C4	2.28674275e-019
	C5	-1.23202729e-022
10	C6	3.32056239e-026
	C7	-4.28323389e-030
	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

15

Asphäre der Linse L604

	K	-1.3312
	C1	-4.03355456e-007
20	C2	2.25776586e-011
	C3	-2.19259878e-014
	C4	4.32573397e-018
	C5	-7.92477159e-022
	C6	7.57618874e-026
	C7	-7.14962797e-030
25	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

Asphäre der Linse L605

30	K	-1.1417
	C1	1.33637337e-007
	C2	1.55787758e-011
	C3	-1.61362484e-014
	C4	3.53793786e-018
35	C5	-5.11312568e-022
	C6	1.70636633e-026
	C7	1.82384731e-030
	C8	0.00000000e+000
40	C9	0.00000000e+000

Asphäre der Linse L607

	K	0.0000
45	C1	1.31745120e-007
	C2	-2.13807543e-011
	C3	1.20275881e-015
	C4	4.33597377e-020
	C5	-2.37132819e-023
	C6	2.87510939e-027
50	C7	-1.47065162e-031
	C8	0.00000000e+000
	C9	0.00000000e+000

55

Asphäre der Linse L609

	K	0.0000
	C1	6.85760526e-009
	C2	-4.84524868e-013
60	C3	-6.28751350e-018
	C4	-3.72607209e-022
	C5	3.25276841e-026
	C6	-4.05509974e-033
	C7	-3.98843079e-035
	C8	0.00000000e+000
65	C9	0.00000000e+000

DE 101 27 320 A 1

Asphäre der Linse L613

K	0.0000	
C1	2.24737416e-008	
C2	-4.45043770e-013	
C3	-4.10272049e-017	5
C4	4.31632628e-021	
C5	-3.27538237e-025	
C6	1.44053025e-029	
C7	-2.76858490e-034	
C8	0.00000000e+000	10
C9	0.00000000e+000	

Asphäre der Linse L616

K	0.0000	15
C1	-2.83553693e-008	
C2	-1.12122261e-011	
C3	-2.05132812e-016	
C4	-1.55525080e-020	
C5	-4.77033112e-024	20
C6	8.39331135e-028	
C7	-8.97333681e-032	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	25

Asphäre der Linse L622

K	0.0420	
C1	7.0730826e-010	
C2	-2.00157185e-014	30
C3	-9.33825109e-020	
C4	1.27125854e-024	
C5	1.94008709e-027	
C6	-6.11989858e-032	
C7	2.92357322e-036	35
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	

Asphäre der Linse L624

K	0.0000	40
C1	3.02835805e-010	
C2	-2.40484062e-014	
C3	-3.22339189e-019	
C4	1.64516979e-022	45
C5	-8.51268614e-027	
C6	2.09276792e-031	
C7	-4.74605669e-036	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	50

Asphäre der Linse L625

K	0.0000	55
C1	-3.99218993e-010	
C2	5.79276562e-014	
C3	3.53211478e-018	
C4	-4.57872308e-023	
C5	-6.29635208e-027	
C6	1.57814931e-031	60
C7	-2.19256130e-036	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	

65

DE 101 27 320 A 1

Asphäre der Linse L628

K 0.0000
C1 4.40737732e-008
C2 1.52385268e-012
5 C3 -5.44510329e-016
C4 6.32549789e-020
C5 -4.58358203e-024
C6 1.92210388e-028
C7 -3.11311258e-033
10 C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

Tabelle 3

L61					
LINSEN	R DIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.13 nm	1/2 FREIER DURCHMESSER
0	0.00000000	34.00000000		1.00000000	82.150
20	0.00000000	0.10000000		1.00000000	87.654
L801	276.744757380	40.00000000	CaF2	1.55970990	90.112
	1413.94109416AS	95.00000000		1.00000000	89.442
SP1	0.00000000	11.00000000		1.00000000	90.034
	0.00000000	433.237005445		1.00000000	90.104
L802	-195.94336384	17.295305525	CaF2	1.55970990	92.746
25	-467.68808527	40.841112468		1.00000000	98.732
L803	-241.385736441	15.977235467	CaF2	1.55970990	105.512
	-857.21727400AS	21.649331094		1.00000000	118.786
SP2	0.00000000	0.000010000		1.00000000	139.325
	253.04839896	21.649331094		1.00000000	119.350
30	L803'	857.21727400AS	CaF2	1.55970990	118.986
	241.385736441	40.841112468		1.00000000	108.546
L802'	467.68808527	17.295305525	CaF2	1.55970990	102.615
	195.94336384	419.981357165		1.00000000	95.689
SP3	0.00000000	6.255658280		1.00000000	76.370
	0.00000000	42.609155219		1.00000000	76.064
35	Z1	0.00000000		1.00000000	73.981
L804	432.514479547	37.784311058	CaF2	1.55970990	90.274
	-522.138532471	113.756133662		1.00000000	92.507
L805	-263.157605725	33.768525968	CaF2	1.55970990	100.053
	-291.910616829AS	14.536591424		1.00000000	106.516
40	L806	589.612961222AS	CaF2	1.55970990	110.482
	-5539.638828792	443.944079795		1.00000000	110.523
L807	221.730582003	9.000000000	CaF2	1.55970990	108.311
	153.071443064	22.790060084		1.00000000	104.062
L808	309.416967518	38.542735318	CaF2	1.55970990	104.062
	-2660.227900099	0.100022286		1.00000000	104.098
45	L809	23655.354584194	CaF2	1.55970990	104.054
	-1473.139213176	9.318886362		1.00000000	103.931
L810	-652.136459374	16.359499814	CaF2	1.55970990	103.644
	-446.439459129	0.100000000		1.00000000	103.877
L811	174.593507050	25.900313780	CaF2	1.55970990	99.267
	392.239615259AS	14.064505431		1.00000000	96.610
50		0.00000000		1.00000000	96.552
L812	7497.306838492	16.759051656	CaF2	1.55970990	96.383
	318.210831711	8.891640764		1.00000000	94.998
L813	428.724465129	41.295806263	CaF2	1.55970990	95.548
	3290.097860119AS	7.377912006		1.00000000	95.040
55	L814	721.012739719	CaF2	1.55970990	95.443
	-272.650872353	6.871397517		1.00000000	95.207
L815	131.257556743	38.826450065	CaF2	1.55970990	81.345
	632.112566477AS	4.409527396		1.00000000	74.847
L816	342.127616157AS	37.346293509	CaF2	1.55970990	70.394
	449.261078744	4.859754445		1.00000000	54.895
60	L817	144.034814702	CaF2	1.55970990	48.040
	-751.263321098AS	11.999872684		1.00000000	33.475
0'	0.00000000	0.000127776		1.00000000	16.430

65

DE 101 27 320 A 1

ASPHAERISCHE KONSTANTEN

Asphäre der Linse L801

Asphäre der Linse L801

K 0.0000
C1 4.90231706e-009
C2 3.08634889e-014
C3 -9.53005325e-019
C4 -6.06316417e-024
C5 6.11462814e-028
C6 -8.64346302e-032
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

5

10

15

Asphäre der Linse L803

K 0.0000
C1 -5.33460884e-009
C2 9.73867225e-014
C3 -3.28422058e-018
C4 1.50550421e-022
C5 0.00000000e+000
C6 0.00000000e+000
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

20

25

Asphäre der Linse L803'

K 0.0000
C1 5.33460884e-009
C2 -9.73867225e-014
C3 3.28422058e-018
C4 -1.50550421e-022
C5 0.00000000e+000
C6 0.00000000e+000
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

30

35

40

Asphäre der Linse L805

K 0.0000
C1 2.42569449e-009
C2 3.96137865e-014
C3 -2.47855149e-018
C4 7.95092779e-023
C5 0.00000000e+000
C6 0.00000000e+000
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

45

50

55

Asphäre der Linse L806

K 0.0000
C1 -6.74111232e-009
C2 -2.57289693e-014
C3 -2.81309020e-018
C4 6.70057831e-023
C5 5.06272344e-028
C6 -4.81282974e-032
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

60

65

DE 101 27 320 A 1

Asphäre der Linse L811

K 0.0000
 C1 2.28889624e-008
 5 C2 -1.88390559e-014
 C3 2.86010656e-017
 C4 -3.18575336e-021
 C5 1.45886017e-025
 C6 -1.08492931e-029
 10 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L813

15 K 0.0000
 C1 3.40212872e-008
 C2 -1.08008877e-012
 C3 4.33814531e-017
 C4 -7.40125614e-021
 20 C5 5.66856812e-025
 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 25 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L815

K 0.0000
 30 C1 -3.15395039e-008
 C2 4.30010133e-012
 C3 3.11663337e-016
 C4 -3.64089769e-020
 C5 1.06073268e-024
 35 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L816

40 K 0.0000
 C1 -2.16574623e-008
 C2 -6.67182801e-013
 45 C3 4.46519932e-016
 C4 -3.71571535e-020
 C5 0.00000000e+000
 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 50 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L817

55 K 0.0000
 C1 2.15121397e-008
 C2 -1.65301726e-011
 C3 -5.03883747e-015
 C4 1.03441815e-017
 60 C5 -6.29122773e-021
 C6 1.44097714e-024
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

Patentansprüche

1. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsan-

lage (81), mit einer Mehrzahl von Linsen (L601–L630, L801–L817), mit mindestens einer Linse (1) aus Fluorid-Kristall, **dadurch gekennzeichnet**, daß die mindestens eine Linse (1) eine (100)-Linse mit einer Linsenachse (EA) ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.

2. Objektiv nach Anspruch 1, wobei die (100)-Linse eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetrieachse ist und die Symmetrieachse mit der Linsenachse der (100)-Linse zusammenfällt.

3. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Linsenachse der (100)-Linse mit der optischen Achse des Objektivs zusammenfällt.

4. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei innerhalb des Objektivs Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609, 713, 715) innerhalb der (100)-Linse einen Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere größer als 30° ist.

5. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei innerhalb des Objektivs Lichtstrahlen von einer Objektebene zu einer Bildebene verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linse Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

betragen, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls.

6. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Blendenebene, wobei die Blendenebene einen Blendendurchmesser aufweist und wobei die (100)-Linse einen Linsendurchmesser aufweist und wobei der Linsendurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.

7. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Bildebene, wobei die (100)-Linse (L630, L817) die der Bildebene nächste Linse ist.

8. Objektiv (611, 711), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,

wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen,

dadurch gekennzeichnet, daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öffnungswinkels θ_R wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.

9. Objektiv nach Anspruch 8, wobei die optischen Wegunterschiede ΔOPL als Funktion des Azimutwinkels α_R für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.

10. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_L bezüglich der Linsenachse abhängen, wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel γ definiert sind, wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

11. Objektiv nach Anspruch 10, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Öffnungswinkel θ_L aufweist und wobei die Öffnungswinkel θ_L innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.

12. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 oder 11, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Strahlweg RL_L zurücklegt und wobei die Strahlwege RL_L innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.

13. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei die bei Drehwinkel $\gamma = 0^\circ$ für die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe bestimmten optischen Wegunterschiede ΔOPL für einen äußersten Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.

14. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei die Gruppe 2 bis 4 Linsen oder Linsenteile umfaßt.

15. Objektiv nach Anspruch 14, wobei die Linsen (L629, L630) oder Linsenteile benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.

16. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 15, wobei das Objektiv mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten Linsen oder Linsenteilen aufweist.

17. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die <111>-Kristallrichtung oder dazu

äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 3-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

18. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 4-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

19. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 2-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

20. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 19, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

21. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 19, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

22. Objektiv nach Anspruch 20 oder 21, wobei sich die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ aus einer ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen ersten Gruppen hervorgerufen wird, und einer zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen zweiten Gruppen hervorgerufen wird, zusammensetzt und sich der Betrag des Maximalwerts der ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% vom Betrag des Maximalwerts der zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ unterscheidet.

23. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 22, wobei der Fluorid Kristall ein Kalzium-Fluorid-Kristall, ein Strontium-Fluorid-Kristall oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist.

24. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 23, wobei das Objektiv eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0,7, insbesondere größer als 0,8 ist.

25. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 24, wobei die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm aufweisen.

26. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 25, wobei die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 160 nm aufweisen.

27. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 26, wobei das Objektiv (611) ein refraktives Objektiv ist.

28. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 27, wobei das Objektiv ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Spiegel (Sp2) ist.

29. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 28, wobei alle Linsen aus Kalzium-Fluorid sind.

30. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend

ein Beleuchtungssystem (83),

ein Objektiv (85) nach einem der Ansprüche 1 bis 29, das eine Struktur tragende Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.

31. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 30.

32. Verfahren zur Herstellung von Objektiven, insbesondere von Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen, dadurch gekennzeichnet,

daß für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für Linsen oder Linsenteile bestimmt wird, daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet werden, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.

33. Verfahren nach Anspruch 32, wobei das Objektiv eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

34. Verfahren nach Anspruch 32, wobei das Objektiv eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

35. Linsenherstellungsverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Platten aus gegeneinander hinsichtlich der Kristallorientierung verdrehtem Kristallmaterial, vorzugsweise Fluorid-Kristall und insbesondere Kalziumfluorid, optisch nahtlos gefügt, insbesondere angesprengt werden und anschließend als ein einheitliches Blank formgebend bearbeitet und poliert werden.

36. Linsenherstellungsverfahren nach Anspruch 35, wobei die Platten jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der Linsenachse abhängen und welche eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

wobei für eine Anzahl von N Platten die Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Platten Drehwinkel γ definiert sind, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Platten gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

37. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 36, wobei zwei Platten nahtlos gefügt werden.

38. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 36 und 37, wobei die Platten annähernd gleiche Dicke aufweisen.

39. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 35 bis 38, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

40. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 39, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken 1.5 ± 0.2 ist.

41. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 35 bis 38, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

42. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 41, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken 4.0 ± 0.4 ist.

43. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 41 und 42, wobei zwei erste Platten mit einer zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

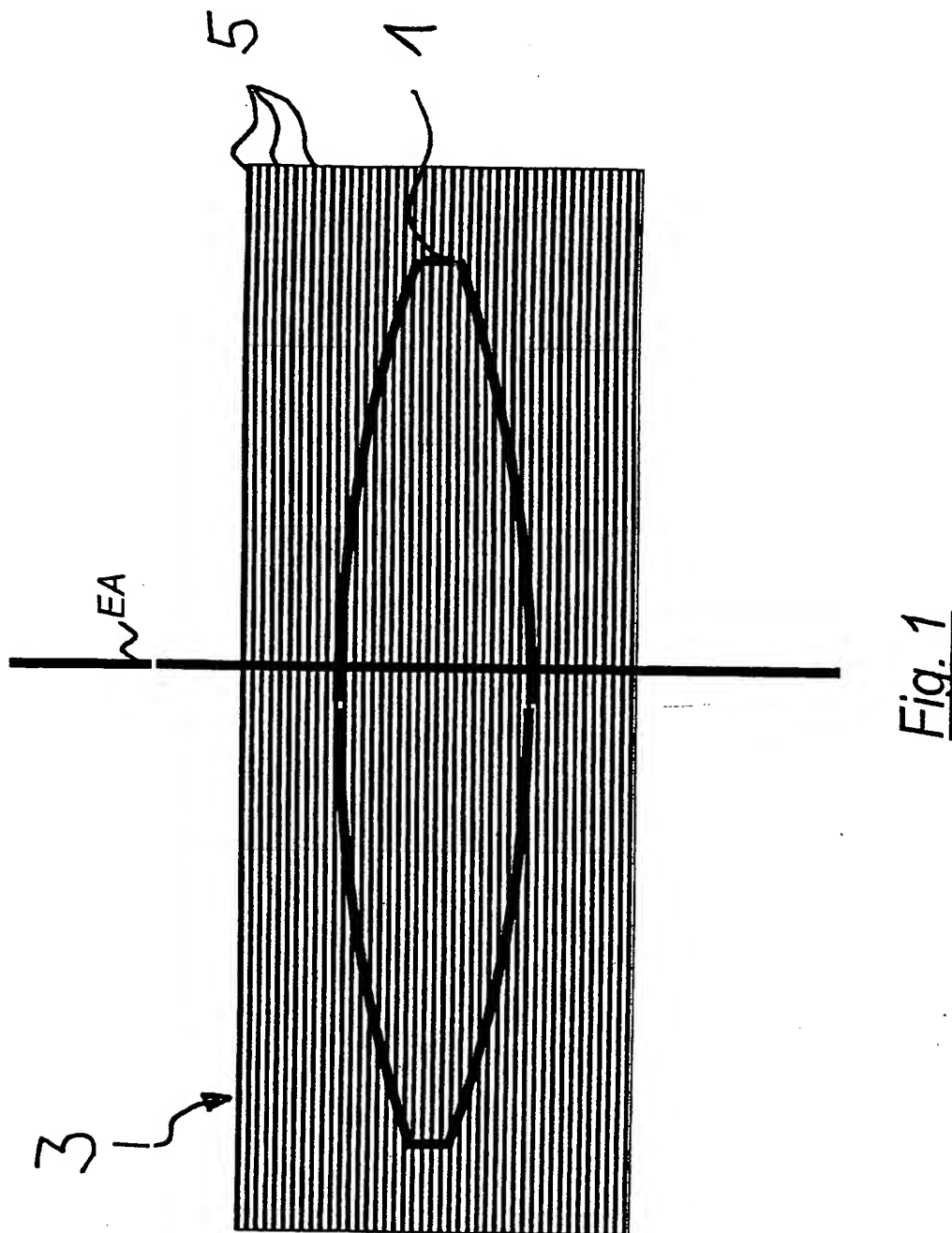
44. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 41 und 42, wobei vier erste Platten mit zwei zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

45. Linse, gekennzeichnet durch die Herstellung nach einem der Ansprüche 35 bis 44.

46. Objektiv, insbesondere ein Projektionsobjektiv (611, 711) für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 45 umfaßt.

47. Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 45 umfaßt.

Hierzu 27 Seite(n) Zeichnungen



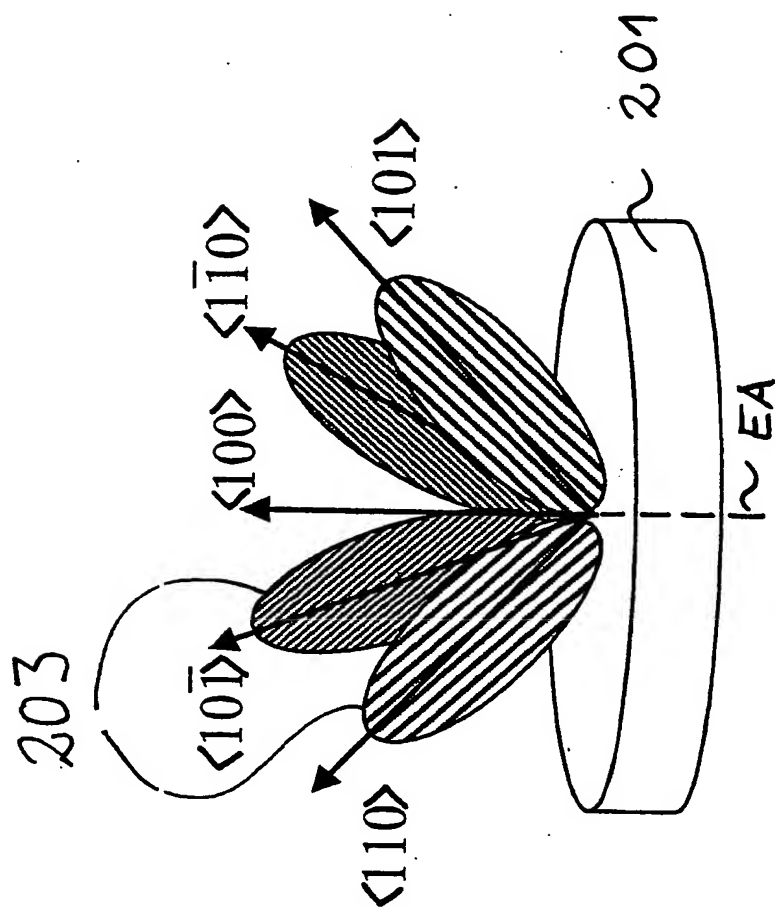
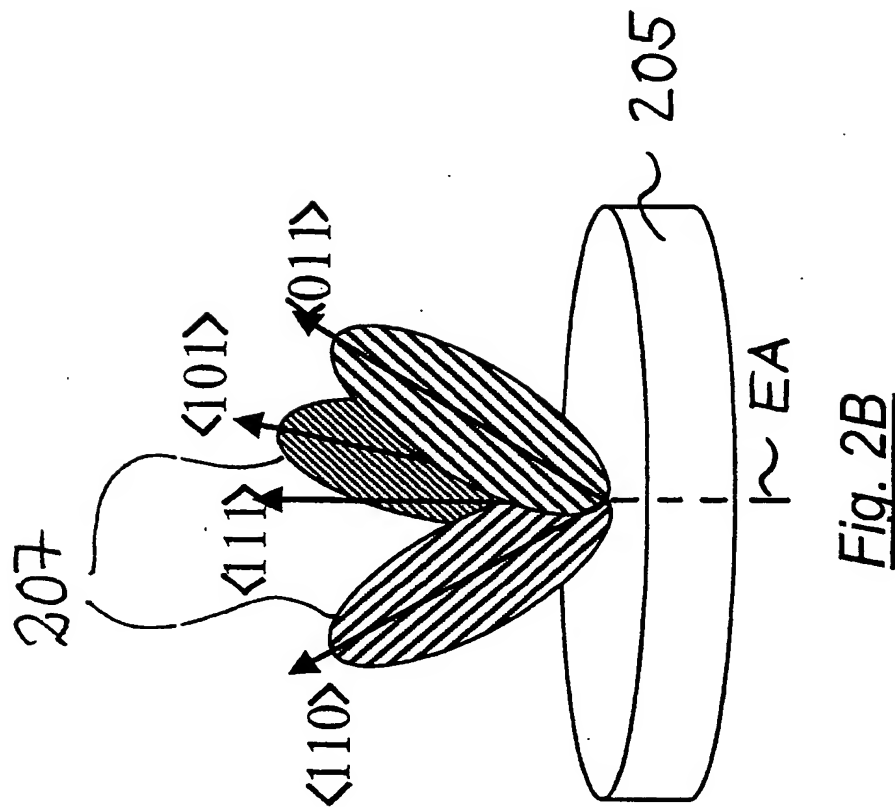


Fig. 2A



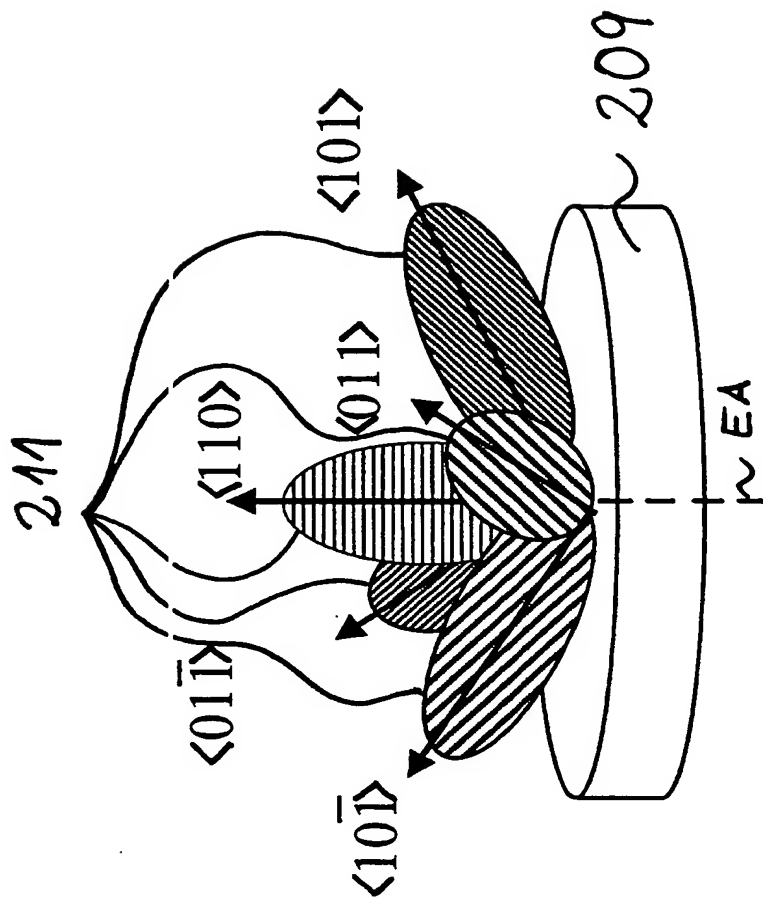


Fig. 2C

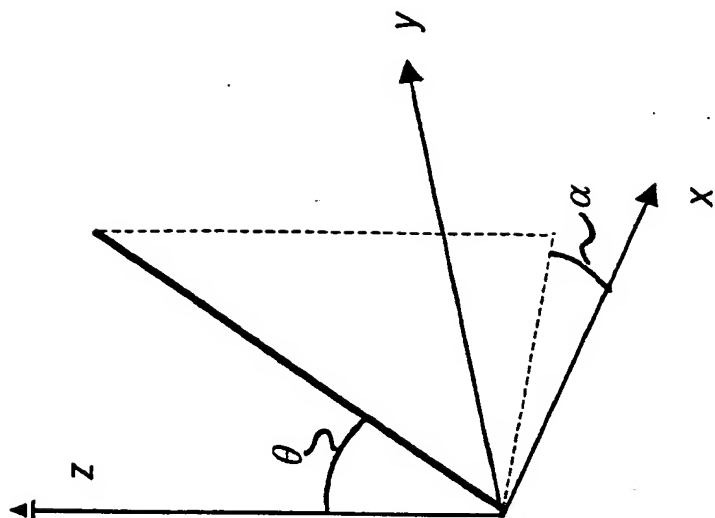


Fig. 3

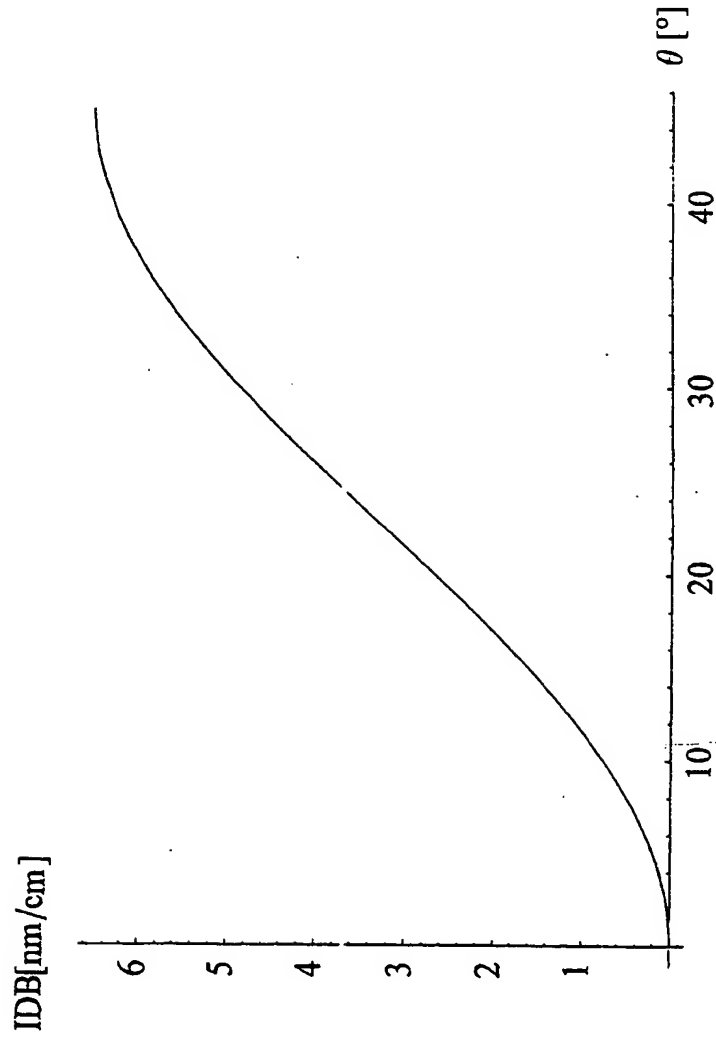


Fig. 4A

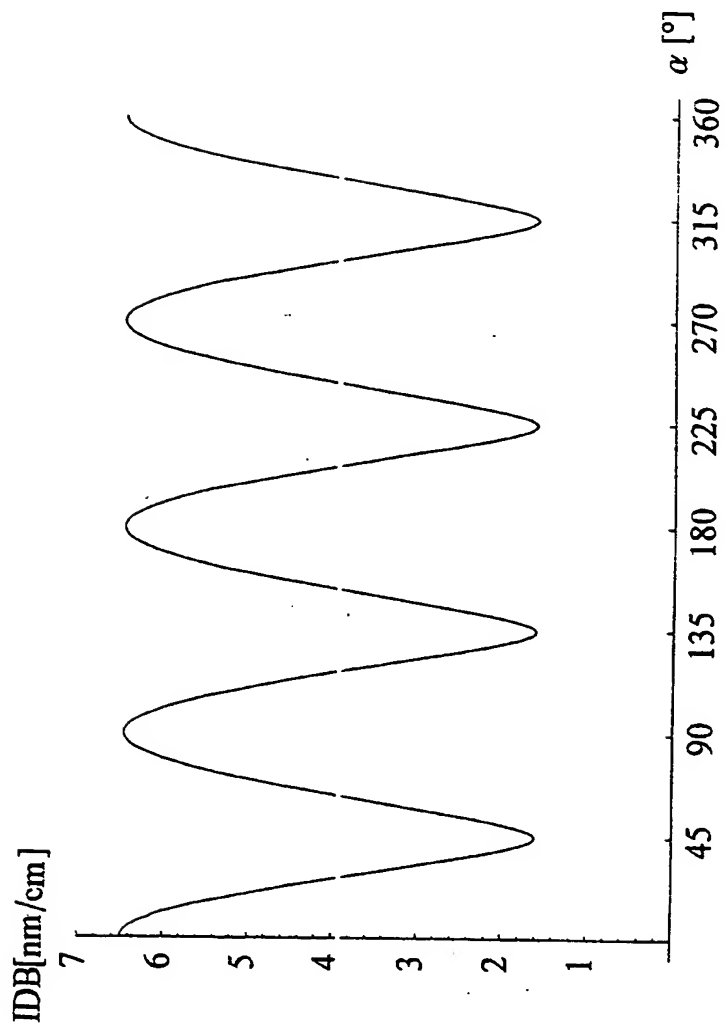


Fig. 4B

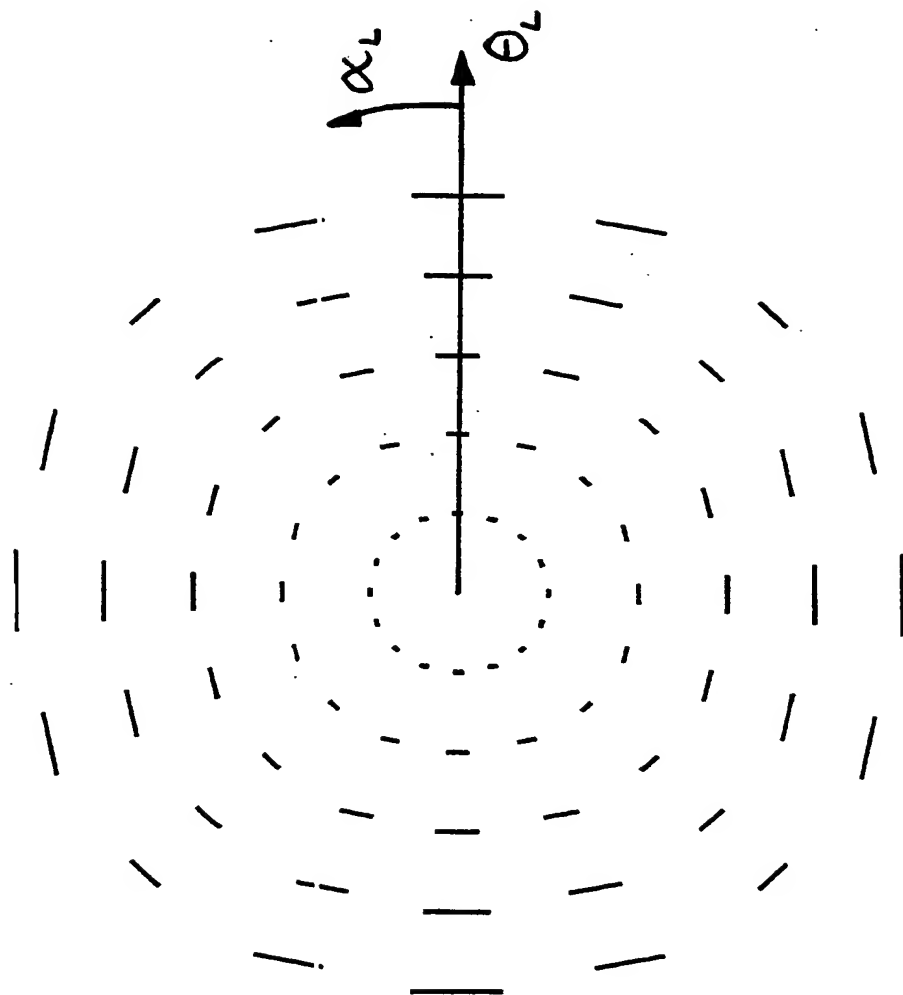


Fig. 4C

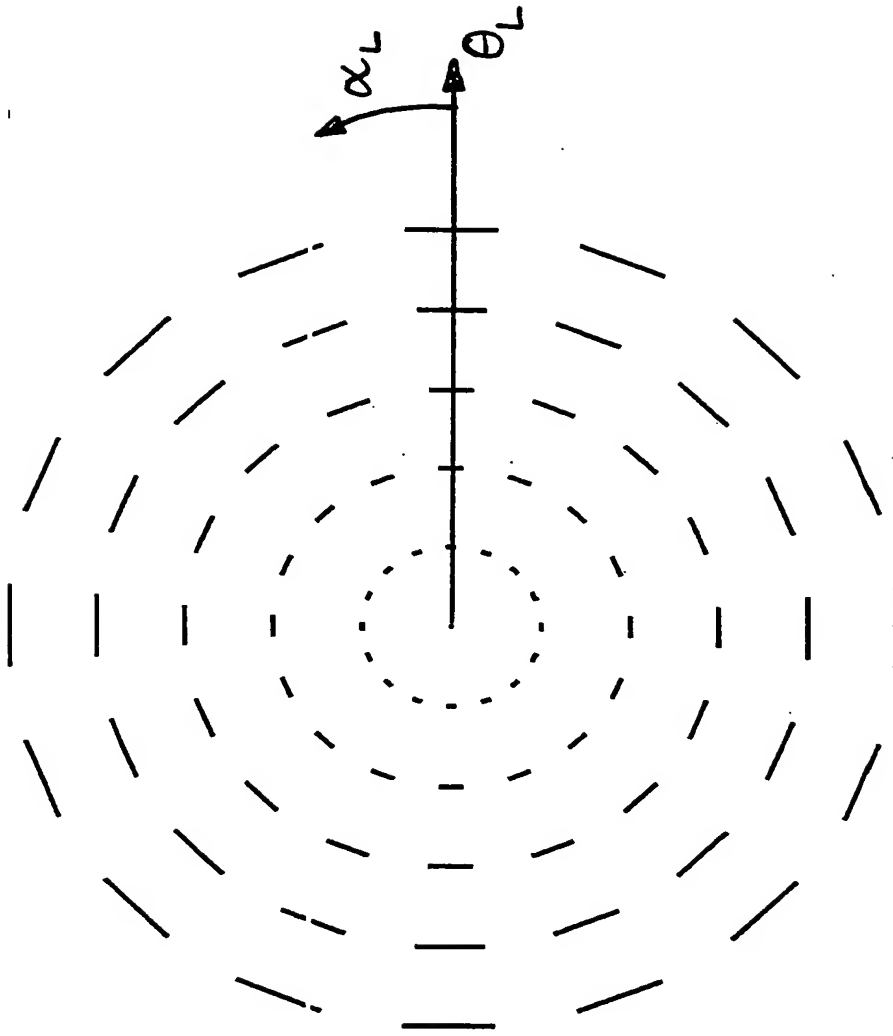


Fig. 4D

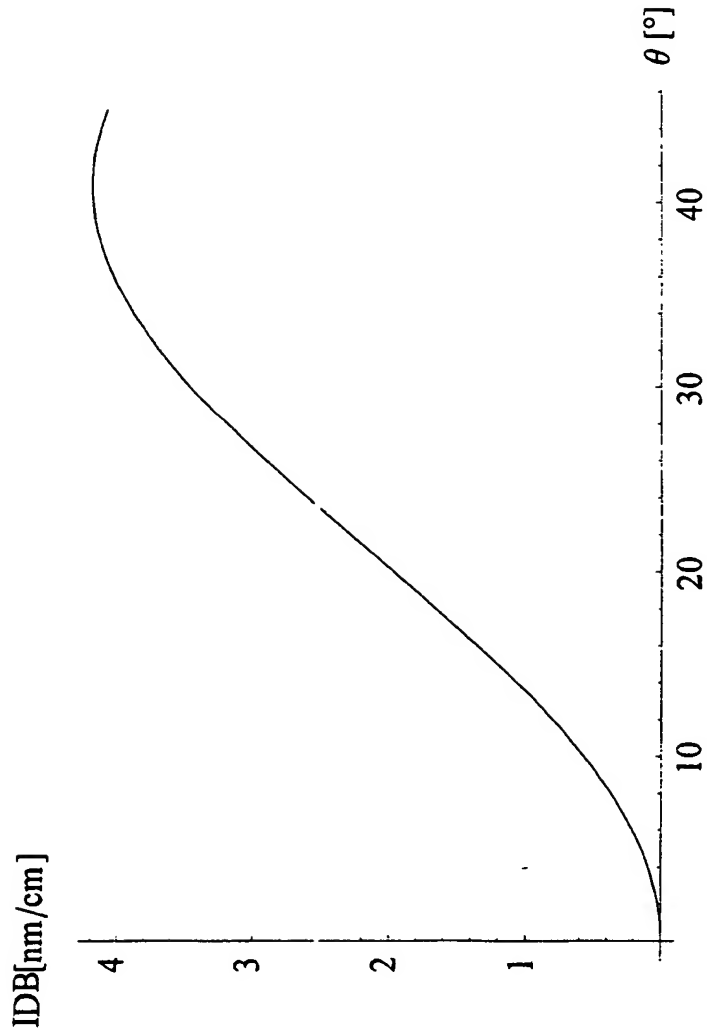


Fig. 4E

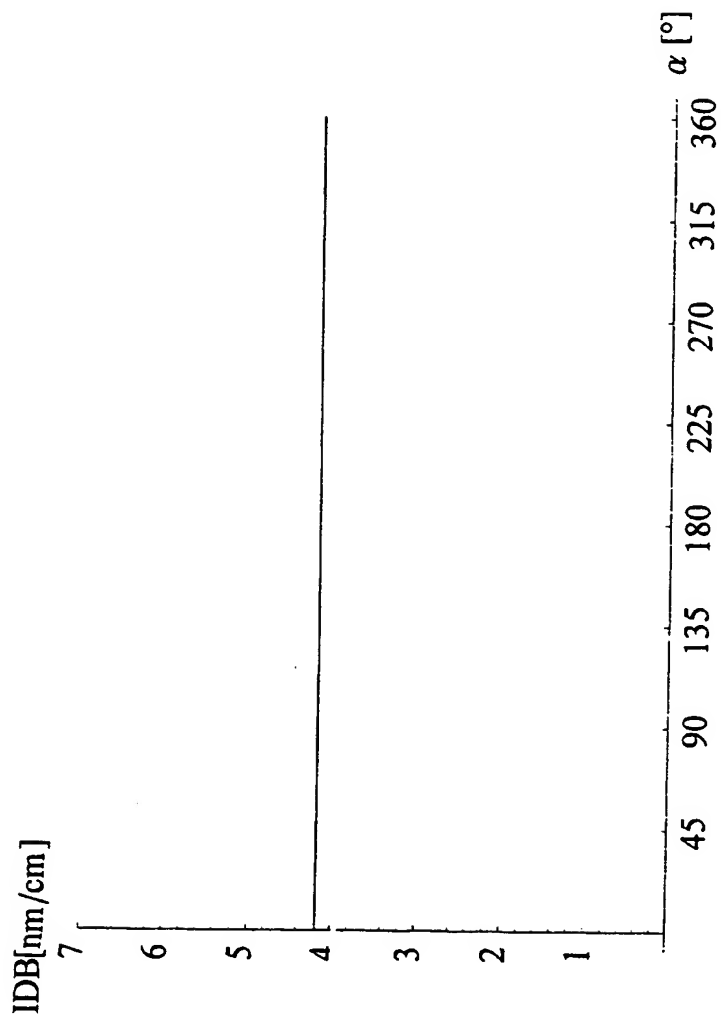


Fig. 4 F

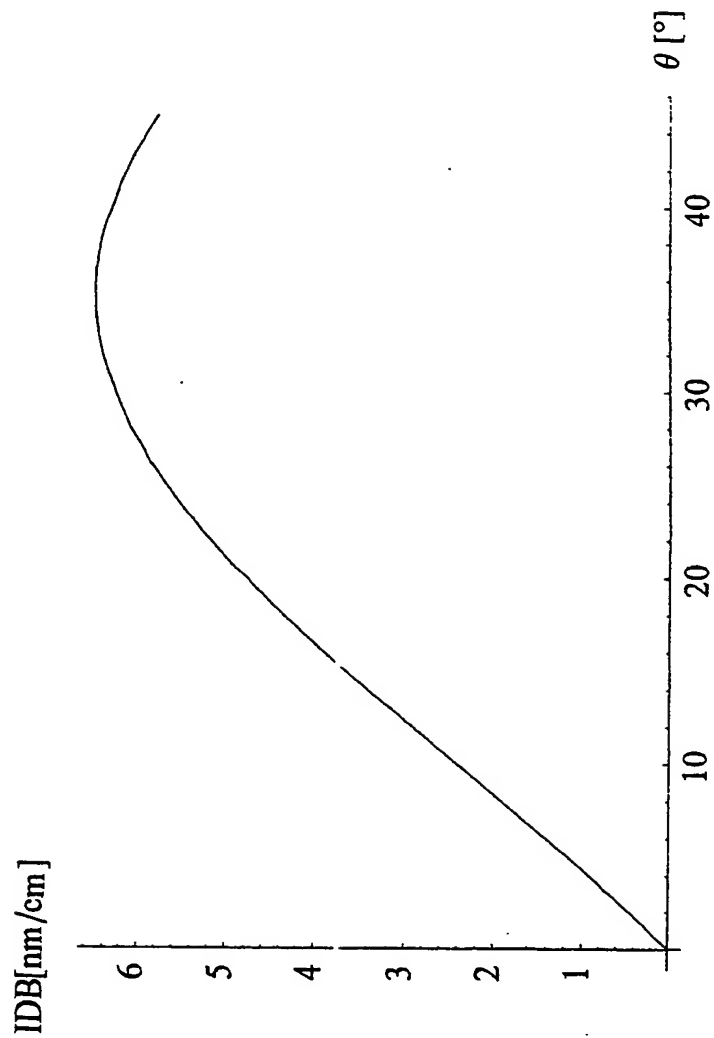


Fig. 5A

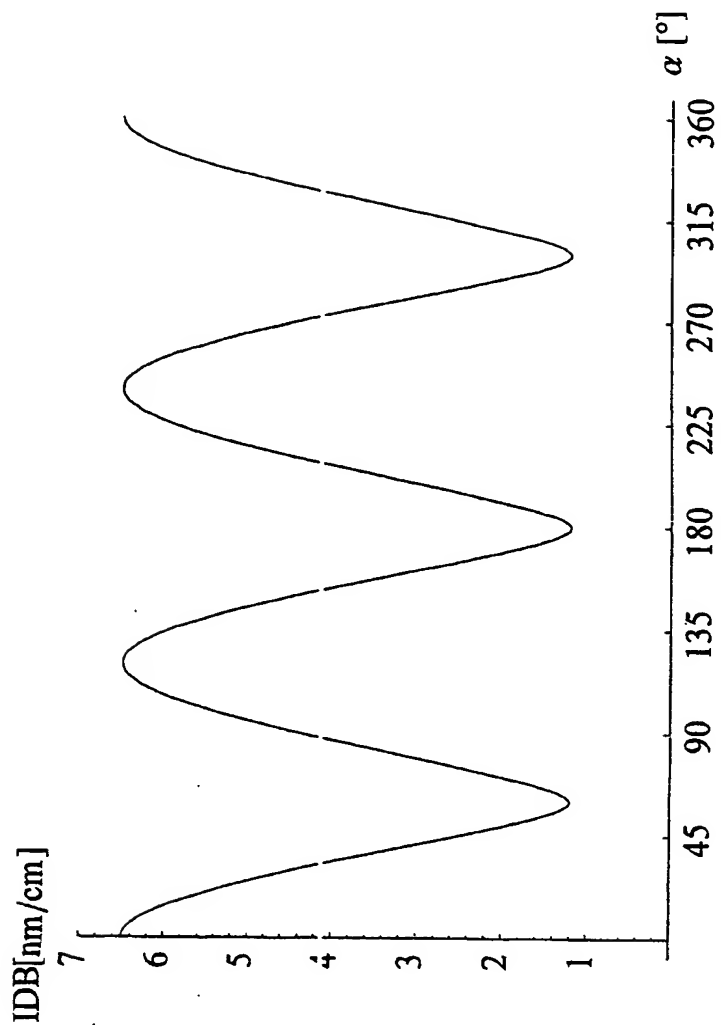


Fig. 5B

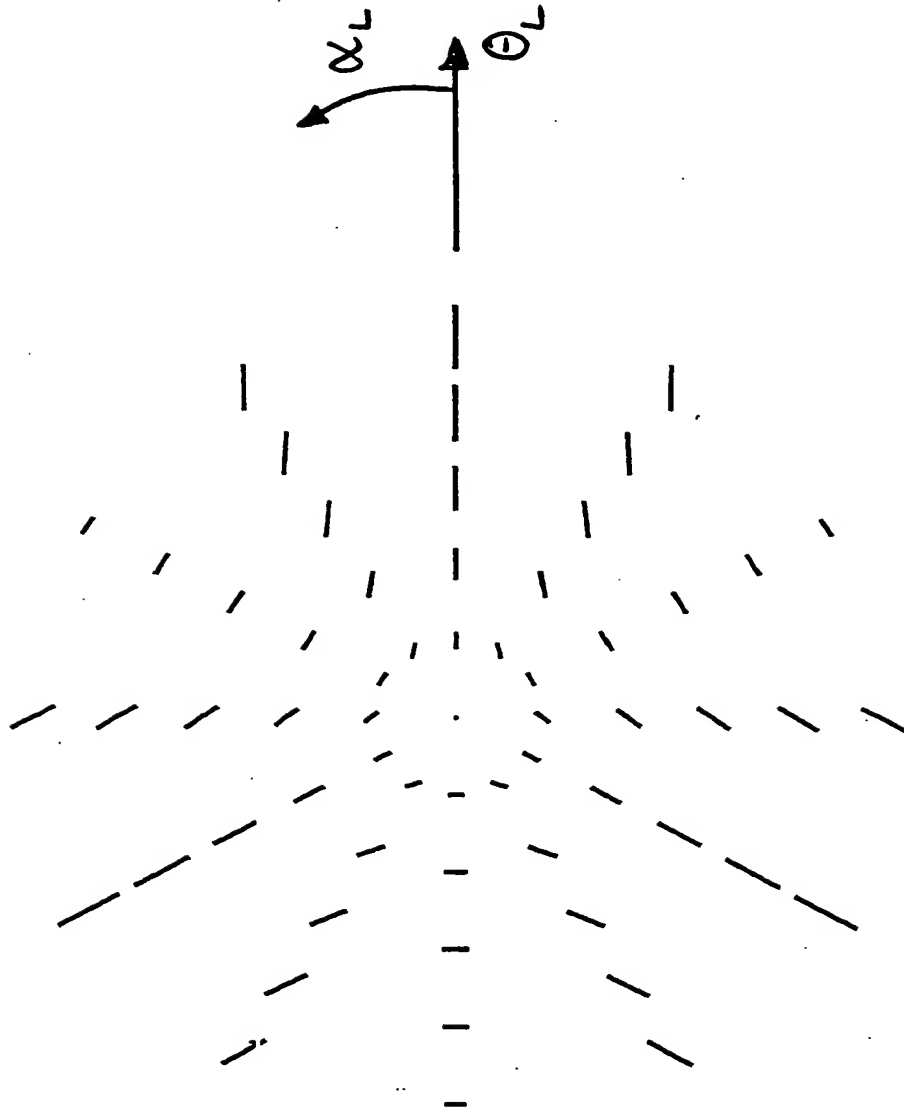


Fig. 5C

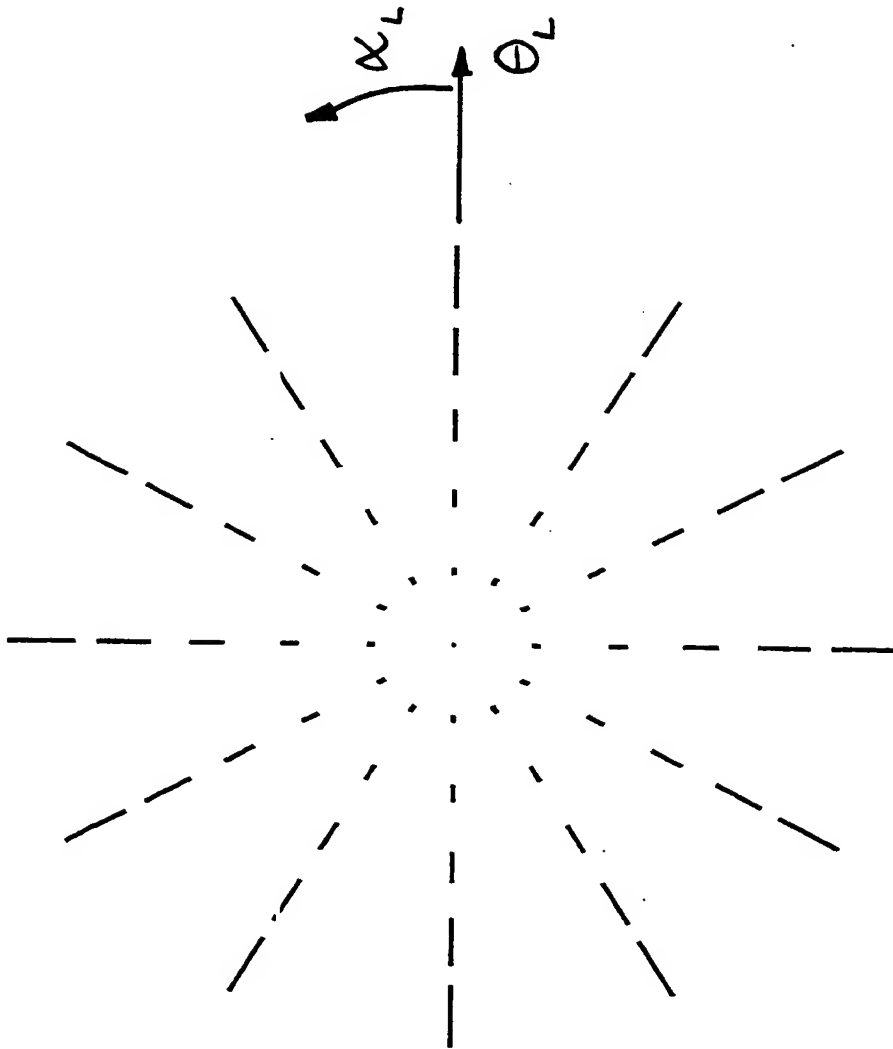


Fig. 5D

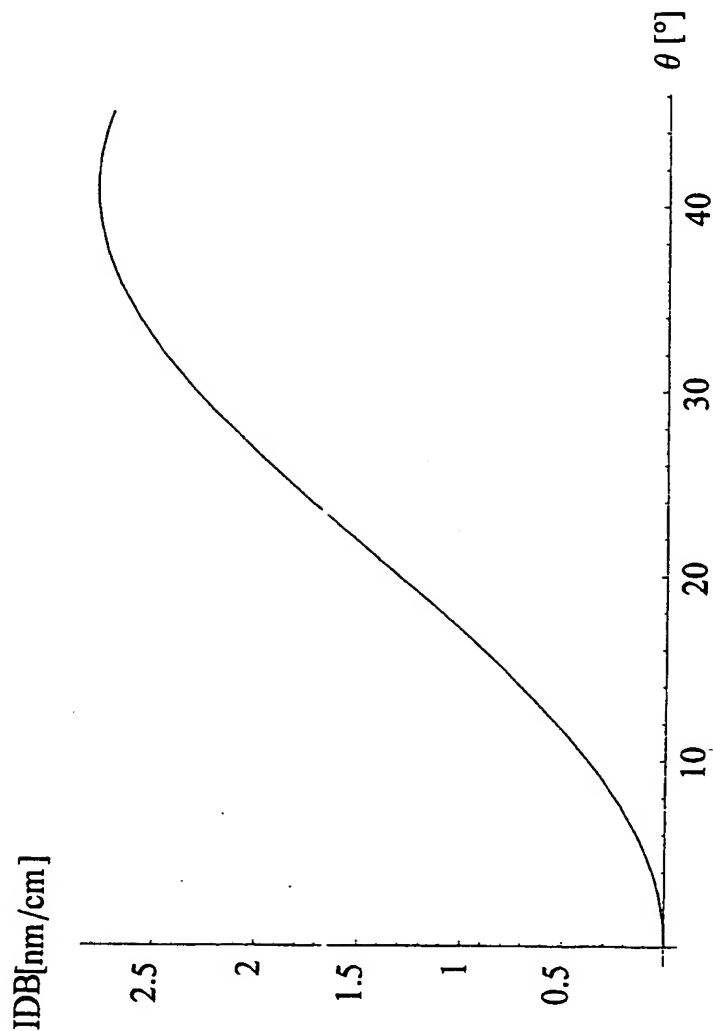


Fig. 5 E

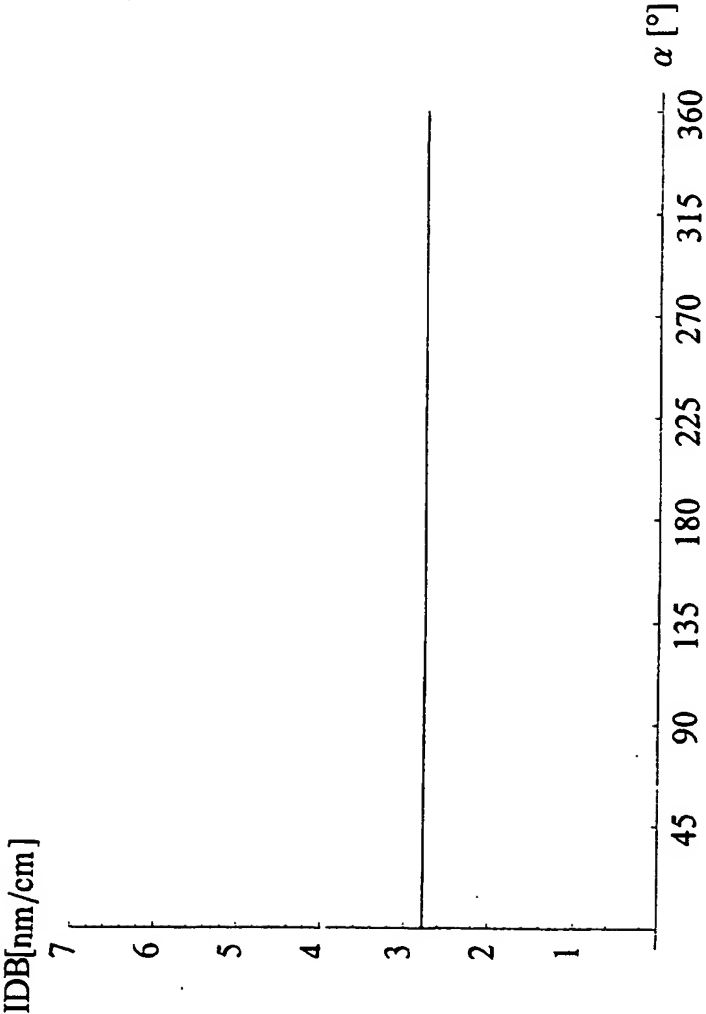


Fig. 5 F

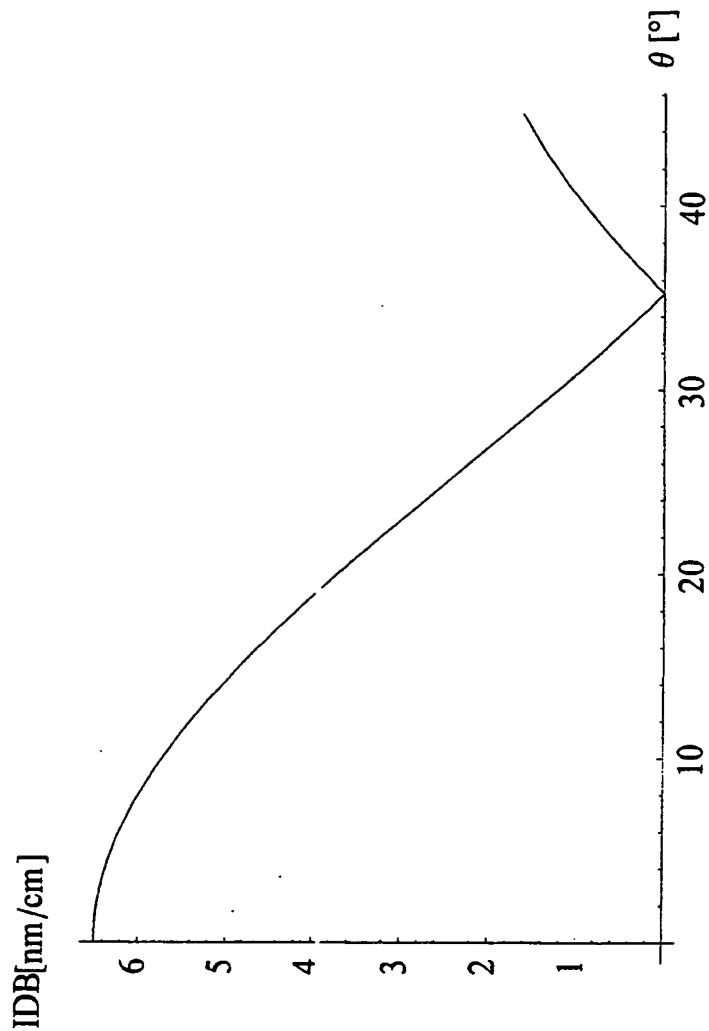


Fig. 6A

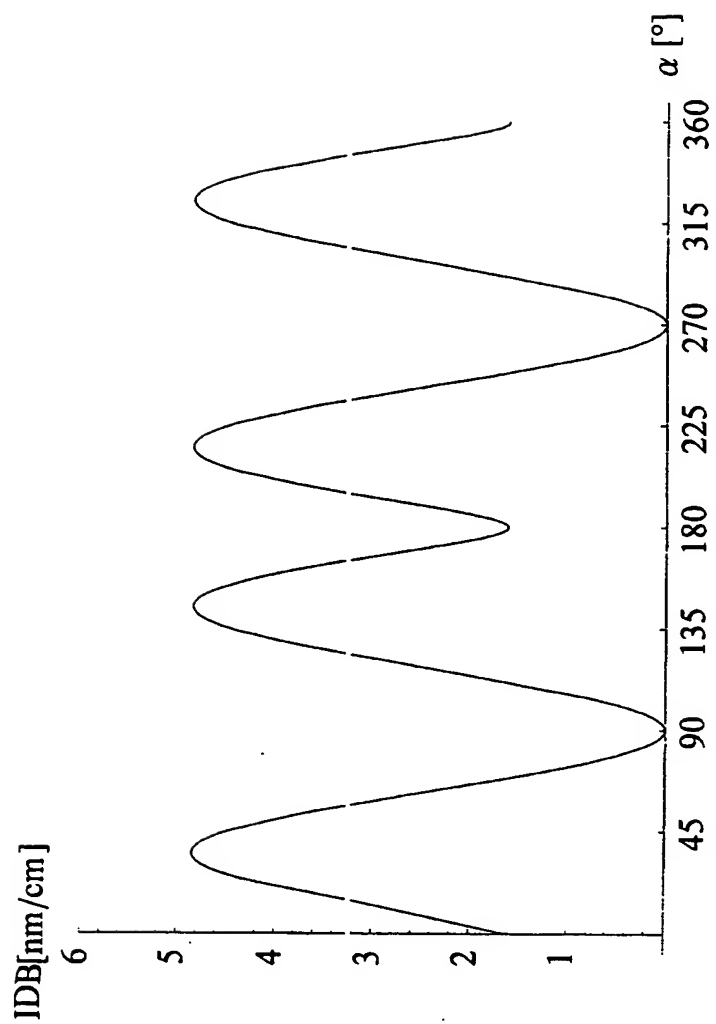


Fig. 6B

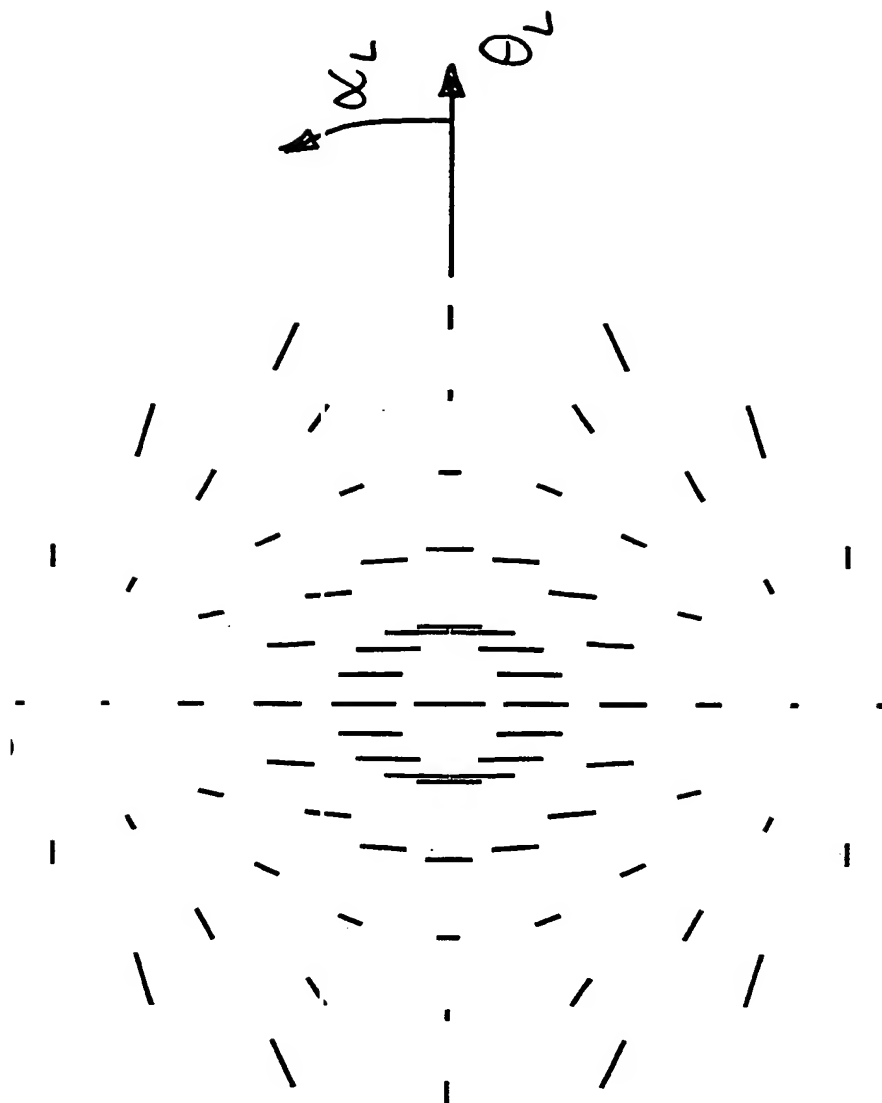


Fig. 6C

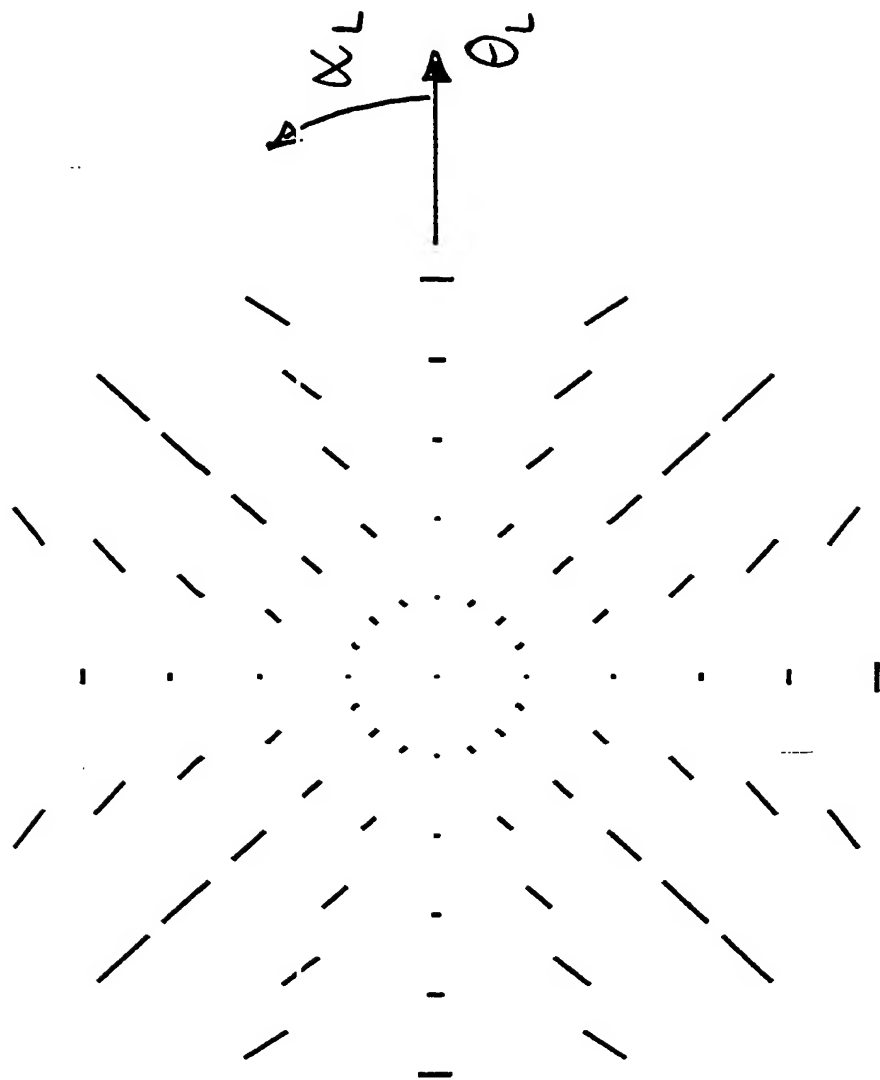


Fig. 6D

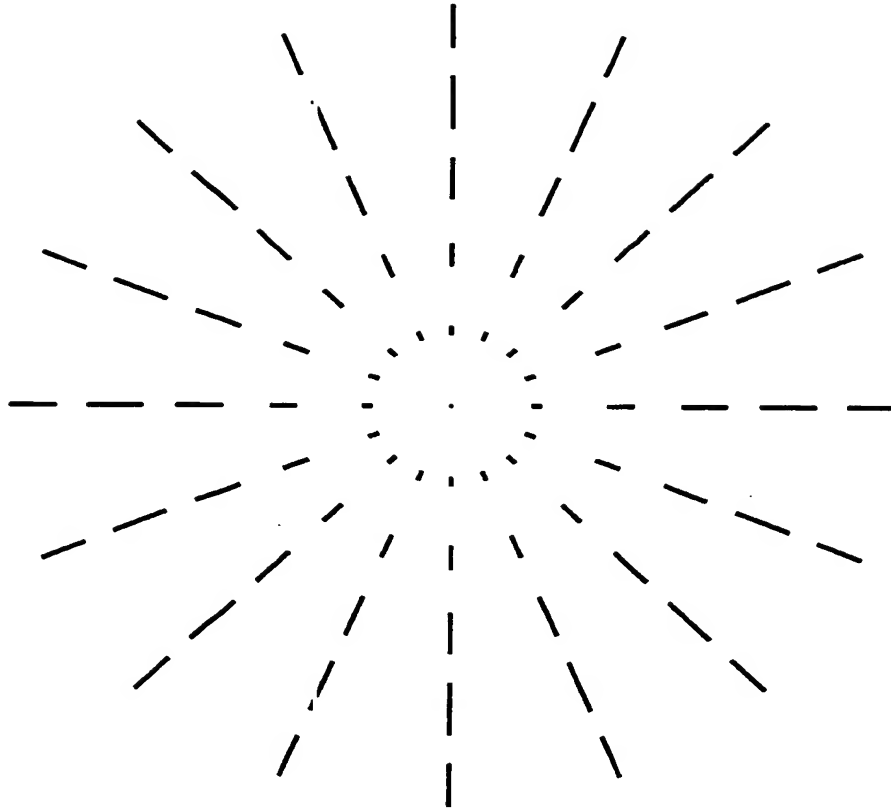


Fig. 6E

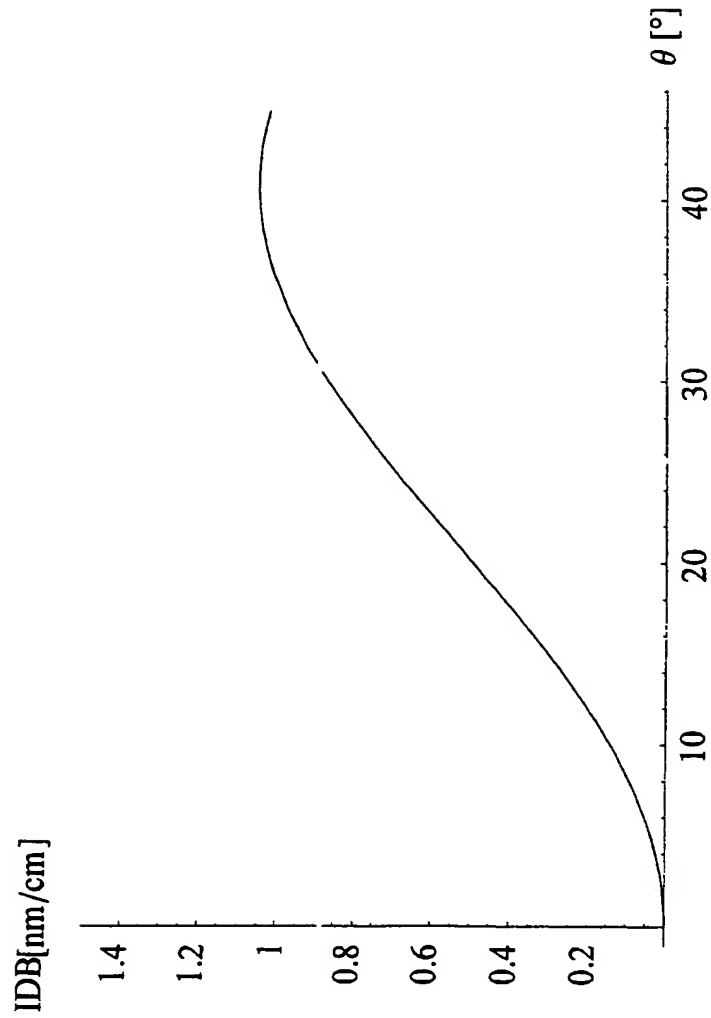


Fig. 6 F

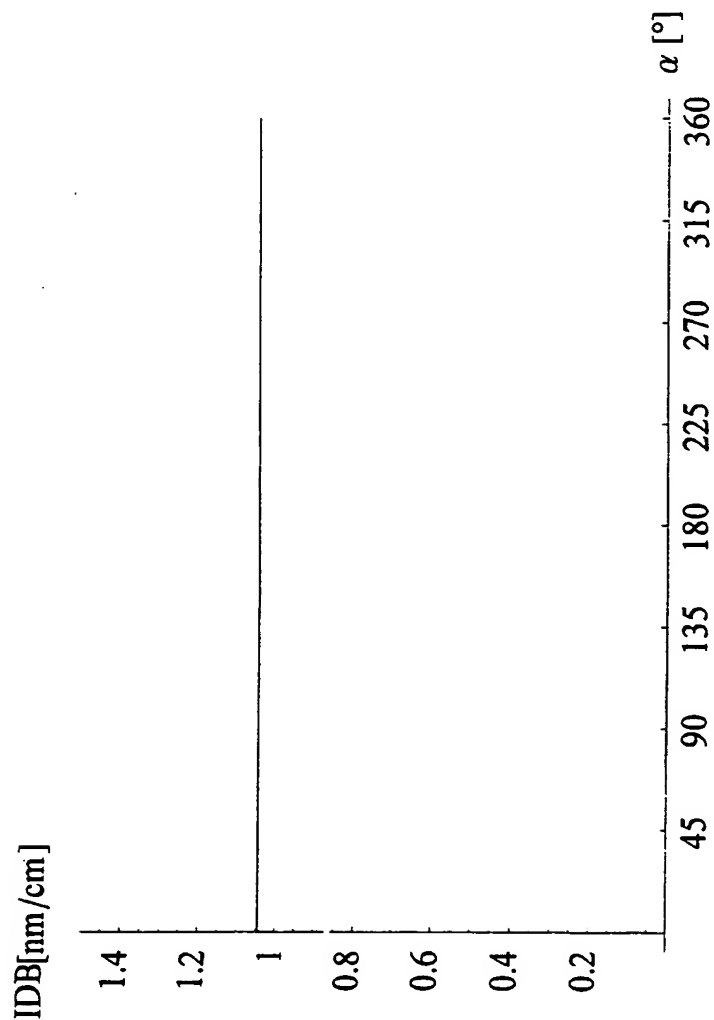


Fig. 6G

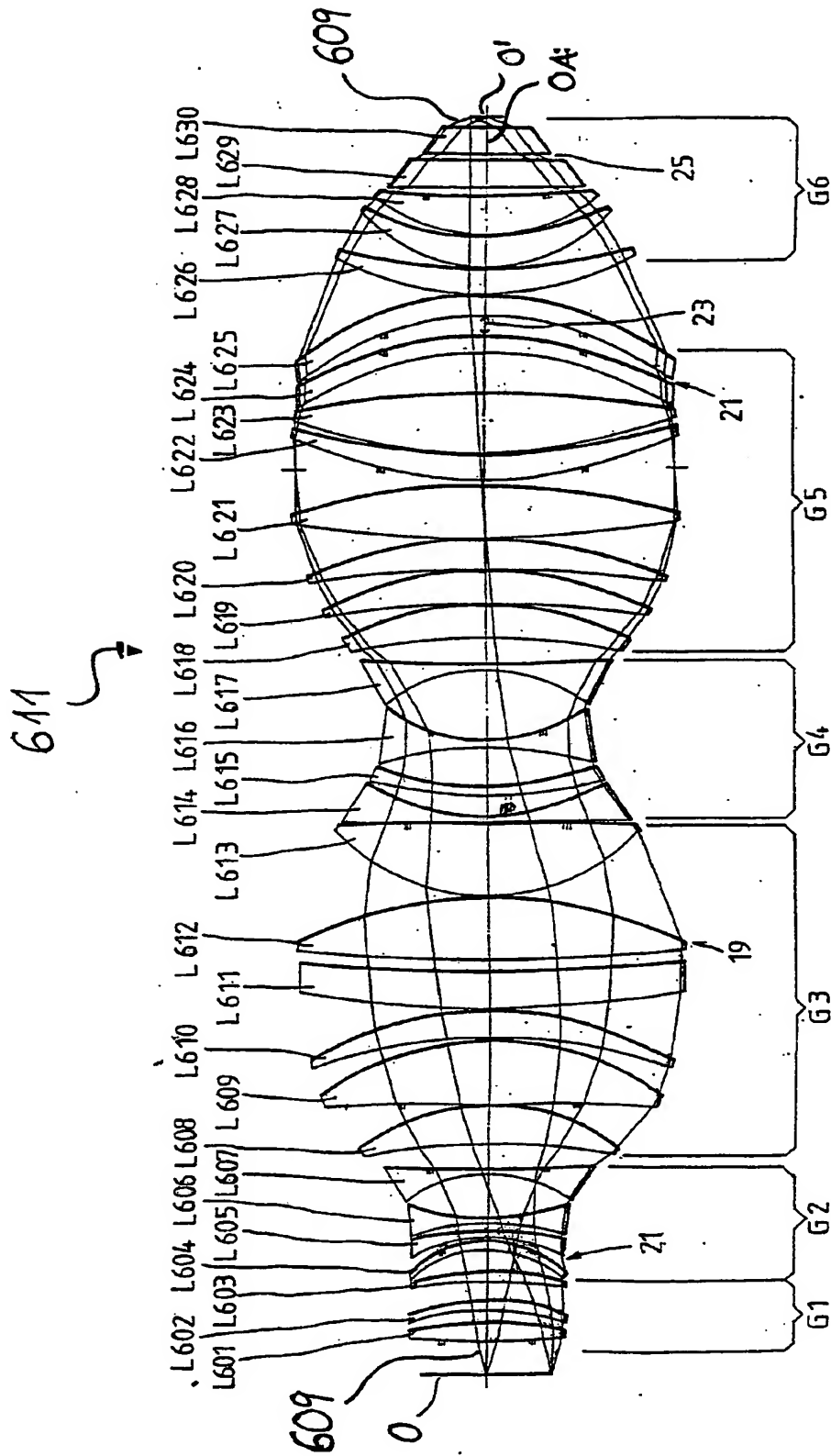


Fig. 7

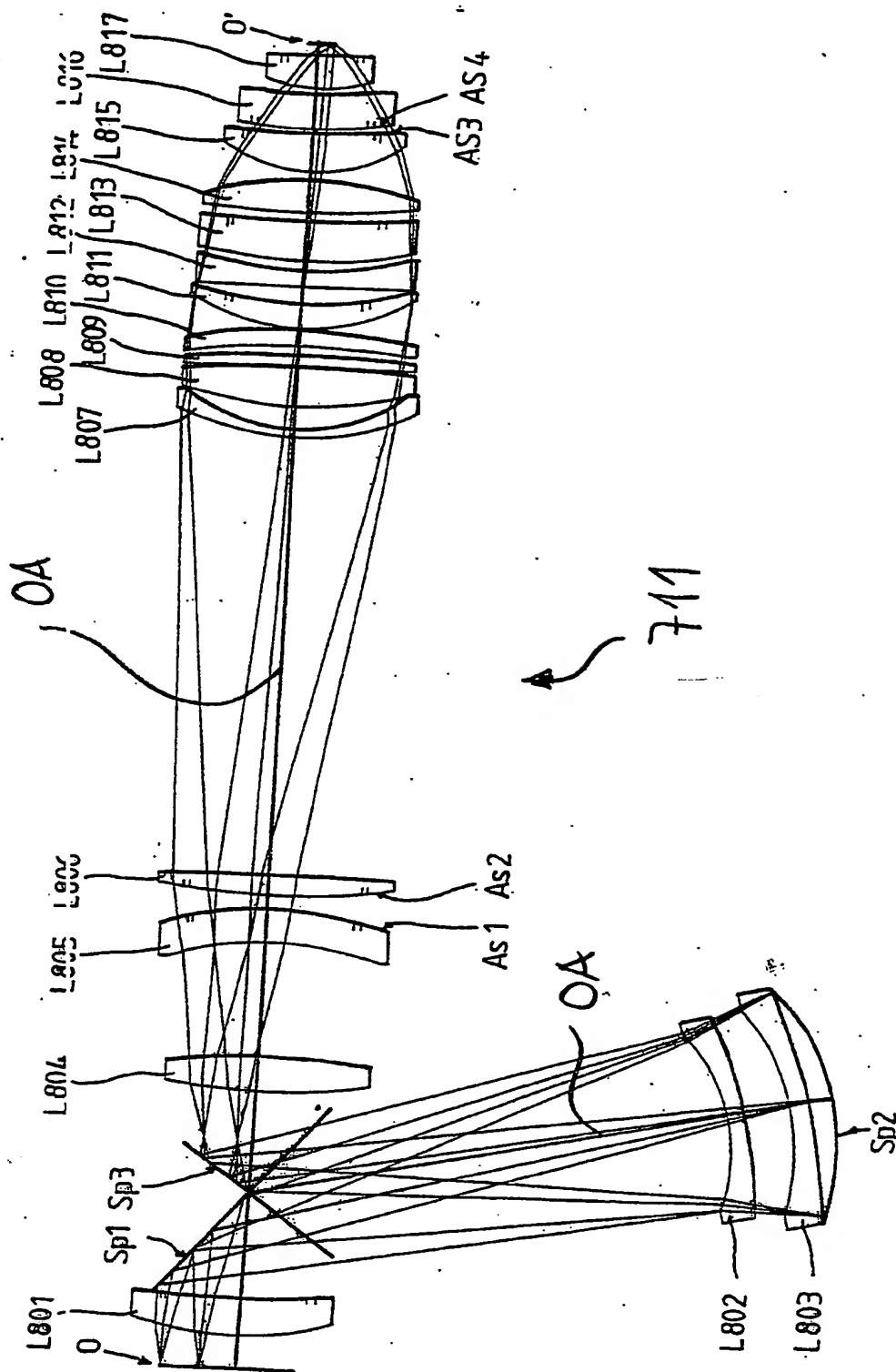


Fig. 8

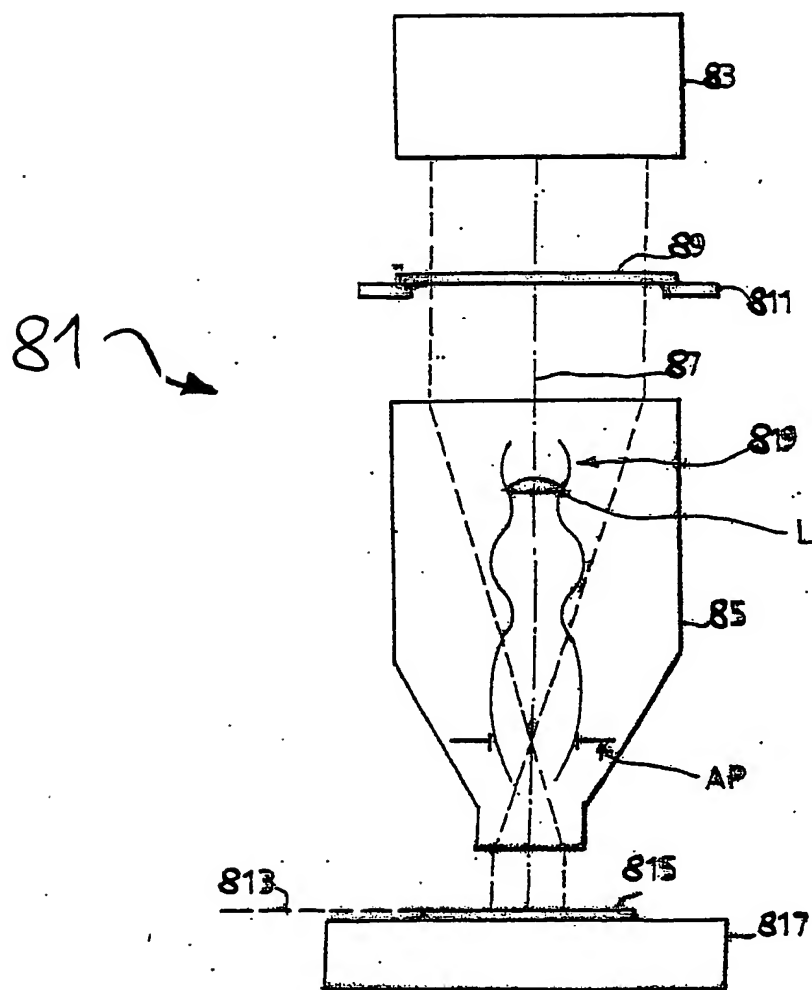


Fig. 9